

文章编号: 1009-3850(2014)04-0001-12

## 珠江口盆地东沙隆起生物礁地质及地震特征

刘丽华<sup>1</sup>, 汪瑞良<sup>1</sup>, 傅恒<sup>2</sup>, 鲁静<sup>2</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518067; 2. 成都理工大学能源学院, 四川 成都 610059)

**摘要:** 东沙隆起珠江组生物礁是珠江口盆地重要的储层类型, 礁灰岩主要为珊瑚藻灰岩, 分为骨架岩、粘结岩及障积岩。研究区生物礁发育于开阔台地、台地边缘及台地前缘斜坡3类沉积相中, 生物礁类型可分为台内点礁、台地边缘堡礁及台缘斜坡塔礁, 以台地边缘堡礁为主。珠江组沉积早期, 东沙隆起发育滨岸砂质沉积; 中期海水逐渐淹没东沙隆起, 形成镶边浅水碳酸盐台地, 发育生物礁; 晚期海侵台地逐渐淹没消亡, 被浅海陆棚泥质沉积代替。流花台地厚度最大, 最厚达563m, 台地顶面地震强反射使外形轮廓清晰, 台地内部中-弱振幅至空白反射, 连续性降低; 惠州台地厚度较流花台地薄, 厚度多大于100m, 顶界面强反射轮廓清晰, 内部层状反射能量强-中振幅、高-中连续、中-低频, 局部空白反射; 陆丰台地厚约30m, 只有一个高连续的强振幅。生物礁地震响应以丘形、箱型、低丘-透镜状为特征, 礁顶常为强振幅, 内部为波状、有时见前积结构, 翼部可见上超和披覆现象等。

**关键词:** 东沙隆起; 珠江组; 生物礁; 地震反射

中图分类号: P512.2

文献标识码: A

珠江口盆地东沙隆起早在20世纪80年代就发现了迄今为止我国最大的海上生物礁油田(LH11-1), 石油地质储量达 $2 \times 10^8$  t, 并相继发现多个生物礁油藏(如陆丰油田等)。生物礁是东沙隆起油气成藏规模仅次于砂岩的储层类型。东沙隆起碳酸盐台地在中新世多期发育, 前人对其地质及地震特征有过一些研究, 但论述均不够全面<sup>[1-13]</sup>。本文利用“十一五”、“十二五”国家重大专项成果, 全面总结东沙隆起生物礁地质及地震特征, 以期东沙隆起碳酸盐岩下一步油气勘探提供决策依据。

### 1 区域地质背景

中国南海位于欧亚、太平洋(含菲律宾)和印度洋3大板块交汇处, 是西太平洋较大的边缘海。珠江口盆地位于南海北部, 是华南大陆的水下延伸部分, 从北向南由北部断阶带、北部裂陷带、中央隆起带、南部隆起带及南部坳陷带形成了三隆三坳的构造格局。东沙隆起构造位置位于中央隆起带东段,

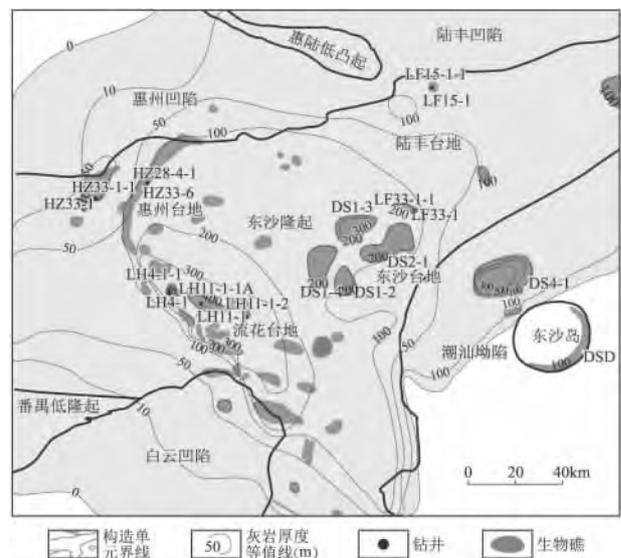


图1 东沙隆起碳酸盐岩厚度图及生物礁分布图

Fig. 1 Carbonate rock thickness and organic reef distribution on the Dongsha uplift

北邻珠一坳陷,东南与白云凹陷相连,是一个被南、北坳陷夹持,由北东向南西倾没的大型鼻状隆起。隆起碳酸盐岩最厚 563m,生物礁发育(图 1)。

珠江口盆地的基底是古生代变质岩、中生代变质岩或沉积岩及燕山期岩浆岩,在白垩纪末期进入离散型大陆边缘构造活动期,新生代分别经历了陆相碎屑岩沉积、海陆过渡相沉积和海相沉积 3 个时期。陆相碎屑岩沉积发育在古近系古新统和始新统,岩石地层从下向上依次为神狐组、文昌组和恩平组,分别为火山喷发、山麓河流-半深湖、浅湖-湖沼沉积;海陆过渡相沉积发育在古近系渐新统珠海组,为滨岸沉积;海相沉积发育在新近系中新统、上新统及第四系,新近系岩石地层从下向上依次为珠江组、韩江组、粤海组及万山组,珠江组发育碳酸盐岩沉积,韩江组为浅海陆棚-三角洲沉积,粤海组及万山组为浅海陆棚沉积,第四系以非补偿浅海陆棚沉积为主(图 2)。珠江口盆地新生代形成演化可分为古新世-始新世断陷、渐新世-中中新世断拗及晚中新世以后坳陷 3 个阶段,至少发生了 6 次大的构造运动,即神狐运动、珠琼运动一幕、珠琼运动二幕、南海运动、白云运动及东沙运动(图 2)。

东沙隆起东高西低,大面积缺失古近系。虽然和盆地一样经历了早期断陷的陆相充填和后期断拗的海相沉积时期,但是其所处位置和长期隆起对沉积有明显的控制作用,沉积演化较之盆地有其独特之处,突出表现为抬升剥蚀时间长。中新世早期发育碳酸盐台地,构造、沉积演化可划分为抬升剥蚀期、碳酸盐台地发育期和陆棚沉积期 3 个时期:

(1) 晚白垩世-早渐新世抬升剥蚀期,晚白垩世-古新世为(神狐运动)块断活动时期,东沙隆起边缘北东向张性断裂开始活动,并伴有广泛的岩浆侵入及强烈的火山喷发;始新世,在珠江口盆地整体区域性沉降的背景上,东沙隆起为剥蚀物源区,局部发育小型断陷盆地,堆积有古近系冲积相和湖泊相沉积;

(2) 渐新世-中中新世为碳酸盐台地发育期,在南海扩张背景下珠江口盆地持续沉降,从早期断陷逐渐向坳陷(断拗)转化,北西向剪切断裂活动停止,东沙隆起海水自西向东侵入,早期海侵限于东沙隆起西段,东段为剥蚀物源区,晚期整个隆起带被海水淹没,形成生物礁、滩发育的碳酸盐台地;

(3) 晚中新世至今为碳酸盐台地淹没及陆棚沉积期,东沙隆起整体快速沉降,断裂活动相对减弱,由于碳酸盐台地(含生物礁)生长速度小于隆起沉降速度,相对海平面上升淹没了碳酸盐台地,来自珠江

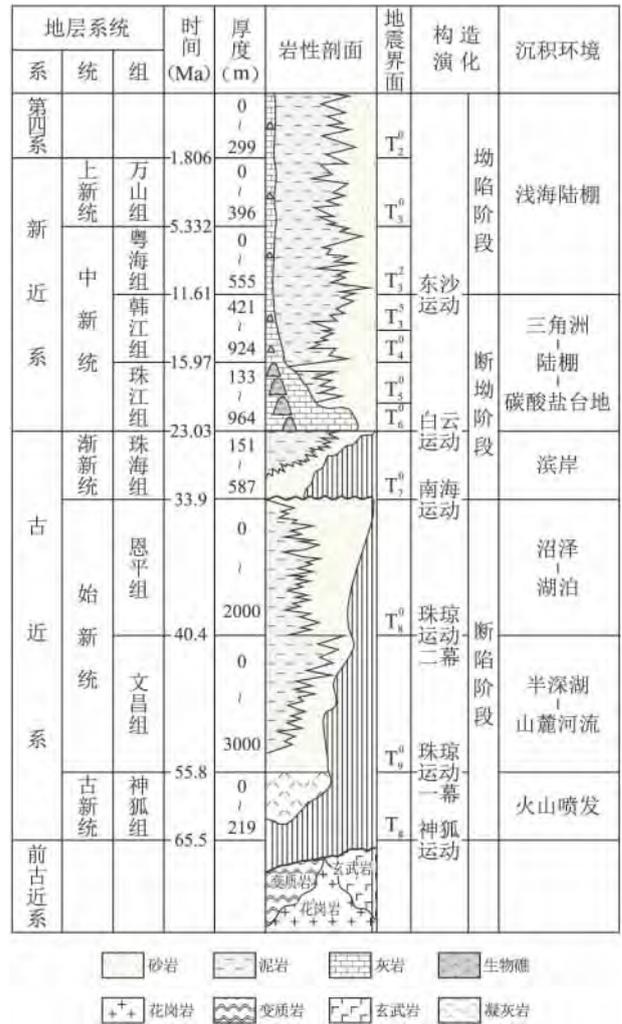


图 2 珠江口盆地新生代构造-沉积演化

Fig. 2 Tectonic-sedimentary evolution of the Zhujiangkou Basin during the Cenozoic

三角洲的细粒碎屑物(泥质)大量注入到隆起带上,碳酸盐台地掩埋在陆源碎屑沉积之下,向上过渡为非补偿的浅海陆架沉积,仅局部高点残存碳酸盐岩沉积(如现今东沙岛)。

## 2 生物礁及其它灰岩岩石学特征

珠江组底部为砂岩、粉砂岩夹少量泥岩,中部为灰岩,顶部以泥岩为主。珠江组在流花地区主要发育灰岩(最厚 562m),在惠州及陆丰地区仅在中下部发育灰岩。灰岩岩石类型包括礁灰岩、颗粒灰岩及微晶灰岩 3 大类。

礁灰岩主要为珊瑚藻礁灰岩。造礁生物主要为珊瑚藻,还见珊瑚、苔藓、海绵、绿藻等。居礁生物有大有孔虫、有孔虫、腕足、腹足、介形虫、棘皮等。根据礁灰岩内填隙物类型及成岩变化分出骨架岩、粘结岩及障积岩 3 类:(1)骨架岩在岩芯上可

见生物骨架结构(图 3A1 ~ A3)。如 LF33-1-1, 珊瑚呈生长状态, 主要为枝状和块状群体珊瑚, 局部见单体珊瑚, 含量高。共生生物有珊瑚藻、有孔虫、苔藓虫、棘皮及其他生屑。孔隙多为粒间、粒内及生物体腔孔等。多为亮晶胶结, 也见灰泥及细小生屑充填, 重结晶作用强; (2) 粘结岩以皮壳状珊瑚藻粘结为主, 藻架类型主要呈结核状藻团, 又称红藻石(图 3B1 ~ B5)。结核状藻团直径一般 3 ~ 7cm, 最大 10cm 以上, 形成于水动力条件较动荡的环境。藻粘结灰岩主要由珊瑚藻粘结灰泥形成, 珊瑚藻多缠绕

或包裹生物屑(有孔虫、苔藓虫等)生长, 生物屑颗粒大小不一, 内部结构比较松散而富孔隙。藻架间充填亮晶藻砂屑, 孔隙、溶孔中充填灰泥, 且可见灰泥云化, 而层序界面附近藻灰岩溶缝中多为渗流粘土; (3) 障积岩以枝状和瘤状珊瑚藻为主, 但有孔虫、腹足、腕足、棘皮等居礁生物含量增加, 生物体腔孔或粒间多充填灰泥, 形成环境水体能量相对较弱。岩芯见珊瑚藻多为结核状, 镜下见缠绕和枝状等(图 3 C1 ~ C3)。

颗粒灰岩的颗粒主要以生物碎屑为主, 多为珊

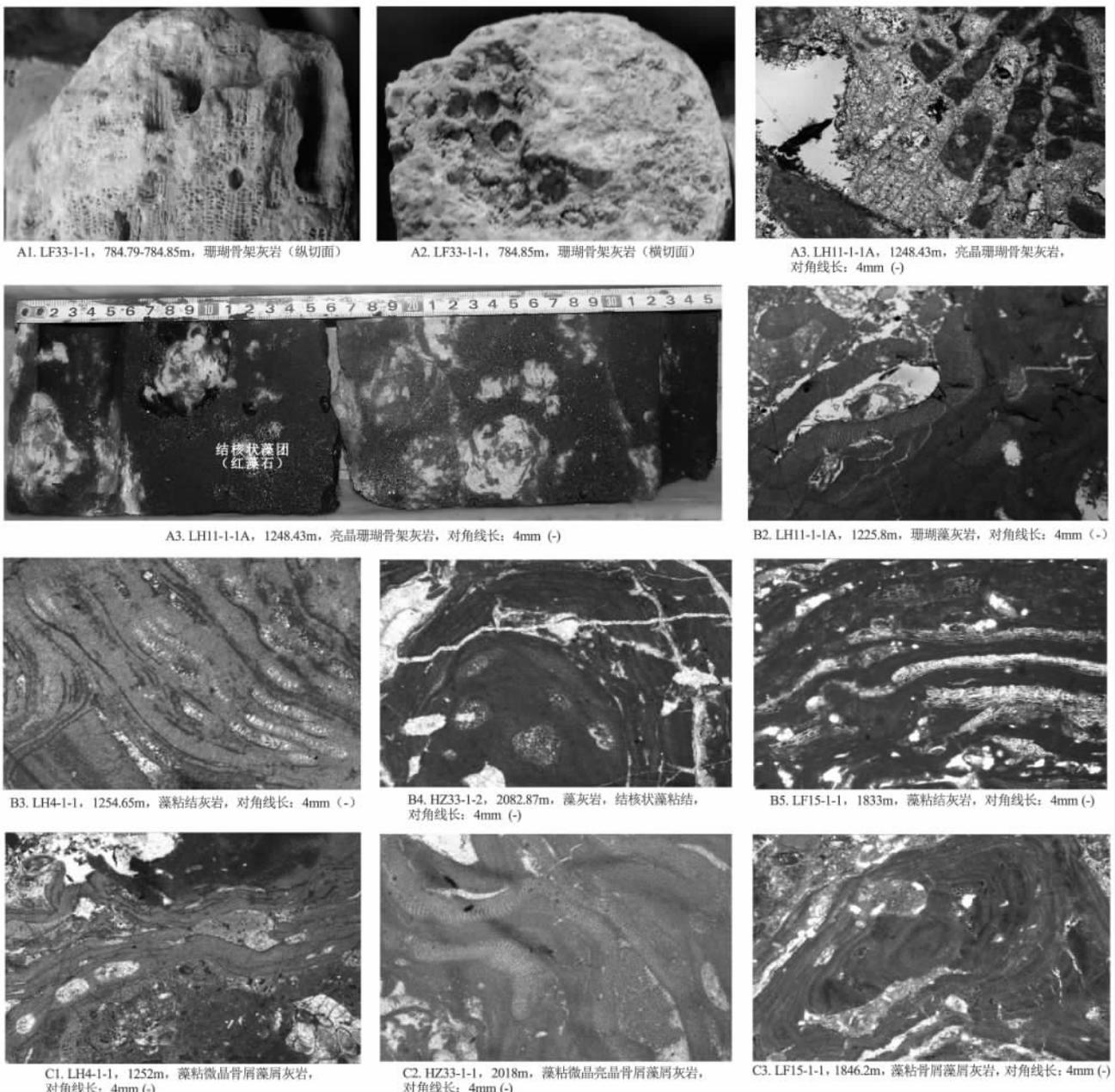


图 3 东沙隆起珠江组礁灰岩岩石学特征

Fig. 3 Petrological features of the reefal limestones from the Zhujiang Formation on the Dongsha uplift

瑚藻、有孔虫、腕足、腹足、厚壳蛤、介形虫和棘皮。生物碎屑灰岩是珠江组最常见的一种岩石类型,形成于生屑滩。粒间为灰泥充填或亮晶胶结,后者形成环境的水体能量更高。根据生屑类型或填隙物类型可细分为藻屑灰岩、骨屑灰岩、有孔虫灰岩、珊瑚屑灰岩、海绵屑灰岩、绿藻屑灰岩及云质生屑灰岩,主要有藻屑灰岩、骨屑灰岩、有孔虫灰岩 3 类:(1)藻屑灰岩是珠江组生屑灰岩最常见的一种岩石类型之一,颗粒大小 0.4~0.6mm,颗粒类型主要为藻屑、有孔虫和骨屑(腹足、介屑、腕足、棘皮),生屑颗粒多数都被打碎。胶结物为粉晶-亮晶方解石世代胶结,粒间不同程度被灰泥充填,沉积环境为能量较高的生屑滩环境(图 4A、B、C);(2)骨屑灰岩颗粒以 0.2~0.5mm 为主,颗粒类型为骨屑(腹足、介屑、腕足、厚壳蛤、棘皮)、藻屑和有孔虫,多数都被打碎。各种骨屑分选较差,混杂堆积,胶结物为粉晶-亮晶方解石世代胶结,粒间不同程度被灰泥充填,沉积环境为能量较高的生屑滩环境(图 4D、E、F);(3)有孔虫灰岩也较常见,颗粒以有孔虫为主,

含量大于 50%,其它生屑少。镜下明显可见有孔虫常呈定向排列,多出现于能量较高的生屑滩环境。但微晶有孔虫灰岩和抱球虫灰岩的沉积环境水动力条件较弱,出现在水体较深的台坪沉积环境(图 4G、H、I)。

微晶灰岩也是珠江组重要的岩石类型,多为生屑微晶灰岩,发育于少数井的少数层段。灰泥基质含量 50%~95%,颗粒含量 5%~25%,具微晶结构,生屑颗粒主要有骨屑、藻屑、有孔虫、珊瑚屑等,偶见海绿石,主要形成于台坪等低能环境。

### 3 生物礁沉积特征

东沙隆起珠江组沉积体系存在碎屑岩和碳酸盐岩两大类。碎屑岩沉积体系包括三角洲、海滩和浅海陆棚 3 类,碳酸盐岩沉积体系包括开阔台地、台地边缘及台地前缘斜坡 3 类。珠江组沉积早期,东沙隆起发育滨岸(海滩)砂质沉积,物源主要来自东沙隆起剥蚀区花岗岩;中期海平面上升,海水逐渐淹没东沙隆起,形成镶边浅水碳酸盐台地;晚期海侵,

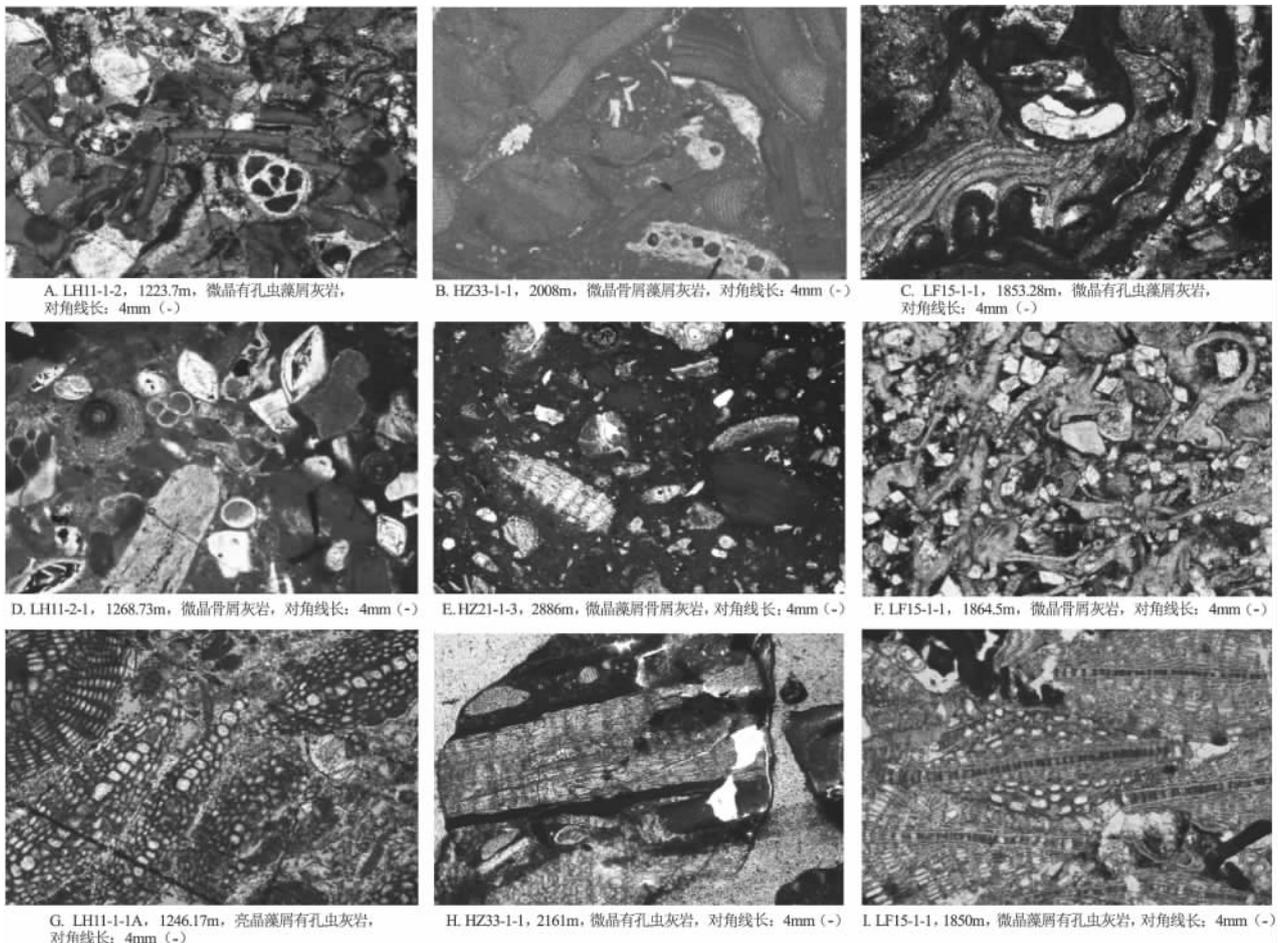


图 4 东沙隆起珠江组颗粒灰岩岩石学特征

Fig. 4 Petrological features of the grainstones from the Zhujiang Formation on the Dongsha uplift

台地逐渐淹没消亡,被浅海陆棚泥质沉积或三角洲前缘砂质沉积代替。受相对海平面升降、古地貌等因素影响,碳酸盐台地分布范围经历了从无到有、由大到小的变化,碳酸盐岩厚度亦存在较明显的差异。流花地区古地貌位置最高,海侵淹没最晚,发育台地边缘礁滩,灰岩厚度最大,多大于300m(最厚563m);陆丰地区古地貌位置最低,海侵淹没最早,灰岩厚度最薄,多小于50m;惠州地区介于两者之间。

东沙隆起珠江组生物礁发育在开阔台地、台地边缘及台地前缘斜坡3类沉积相中,据此分为台内点礁(补丁礁、斑礁)、台地边缘堡礁(堤礁)及台缘斜坡塔礁3种类型。除LF15-I台内点礁、HZ33-I台缘斜坡塔礁外,主要发育台地边缘堡礁(图5)。

开阔台地主要为台地边缘之后的开放潟湖,水体能量一般较低,水循环较好,盐度基本正常,适合各种生物生长。但由于沉积地貌的变化引起水体能量变化,灰岩沉积结构变化较大,可形成各类灰岩,可分出台内礁(点礁)、台内滩、台坪(滩间、潟湖)亚相(图5):(1)台内礁是发育于开阔台地内的生物建隆,又称点礁、补丁礁或斑礁,沉积环境在开阔台地整体低能的沉积背景下相对高能,面积不大,多孤立分布于东沙隆起北部及西南部。珠江组台内礁以发育珊瑚藻礁为特征,根据岩石结构可细分出骨架岩、粘结岩及障积岩微相,其中粘结岩微相最发育;(2)台内滩是开阔台地内局部古地貌高地受到较强的波浪改造,形成以颗粒灰岩沉积为主的沉积体,主要发育生屑滩微相。台内滩沉积厚度与台地边缘滩相比明显偏薄,横向分布不稳定,常以薄层或透镜状夹于台内礁中;(3)台坪(滩间、潟湖)为开阔台地滩间浪基面下的低能灰泥沉积,分布广,岩性以微晶灰岩、微晶有孔虫灰岩、微晶抱球虫灰岩为主,常含有生屑,局部含泥质。

台地边缘位于开阔台地向台地前缘斜坡-陆棚过渡的高能带,发育台地边缘生物礁和台地边缘生物滩亚相(图5):(1)台地边缘生物礁位于台地边缘破浪带附近,海水循环良好、营养充足,珊瑚藻等造礁生物快速生长,常常沿台地边缘发育带状堡礁(又称堤礁)。向外海一侧过渡为台地前缘斜坡-陆棚深水沉积,向台地一侧过渡为台地边缘浅滩-潟湖(台坪)沉积。台地边缘生物建隆形成的灰岩厚度最大,流花地区最大可达562m。造礁生物主要有珊瑚藻(红藻)、珊瑚、海绵、苔藓、绿藻等,以藻类为主,并具缠绕结构、皮壳状结构和结核状结构等。

根据岩性可进一步细分为骨架岩、粘结岩和障积岩微相;(2)台地边缘浅滩多位于台地边缘生物礁向台地一侧之后,但在台地边缘生物礁不发育的地区,台地边缘浅滩向外海一侧可向台地前缘斜坡-陆棚过渡。台地边缘浅滩水动力条件强,生屑滩发育,灰泥组分含量少,条件适宜时又可发育形成礁体,形成交替演化的礁滩互层。东沙隆起珠江组台地边缘浅滩主要由珊瑚藻、珊瑚、大有孔虫、有孔虫、腹足、腕足、介形虫等生物碎屑组成,颗粒含量可达55~70%,见定向排列及破碎的砂砾屑。岩性以微(亮)晶藻屑灰岩、微(亮)晶骨屑灰岩、微(亮)晶有孔虫灰岩为主,珊瑚屑灰岩、海绵屑灰岩和绿藻屑灰岩局部出现。

台地前缘斜坡位于台地边缘向海一侧浪基面下,在低能的斜坡灰泥沉积背景下还发育高能的浊积、塌积、混积及局部生物建隆,根据坡度及沉积特征可分为缓坡、陡坡及塔礁亚相(图5):(1)缓坡坡度相对较小,相带相对较宽,发育在东沙隆起珠江组碳酸盐台地北侧陆丰地区,根据岩性可细分出钙屑浊积、混积、斜坡灰泥微相。钙屑浊积是物源来自台地的灰岩碎屑颗粒流沉积。混积是物源来自西北部古珠江三角洲的砂质、粉砂质、泥质与斜坡灰泥的混合沉积。斜坡灰泥是缓波浪基面下的低能沉积;(2)陡坡坡度相对较大,相带相对较窄,发育在东沙隆起珠江组碳酸盐台地南西侧流花地区台地边缘(断层上盘)断层外侧(断层下盘),根据岩性可细分出塌积和斜坡灰泥微相。塌积是物源来自台地边缘碳酸盐岩(礁、滩)垮塌的沉积,在地震剖面表现为杂乱反射,多发育在陡坡坡脚。斜坡灰泥是陡波浪基面下的低能沉积;(3)塔礁是斜坡上的生物建隆,发育在东沙隆起珠江组碳酸盐台地西侧惠州地区HZ33-I-I,根据岩性可细分为骨架岩、粘结岩、障积岩。

东沙隆起珠江组不同地区从下向上均可划分出3个沉积相单元,即滨岸相、碳酸盐台地相和陆棚相,纵向沉积序列具有共同性。由于古地貌及后期海侵时间的差异性,东沙隆起流花、惠州及陆丰地区碳酸盐台地沉积厚度及发育时间存在明显的差异性。陆丰、惠州及流花地区位于东沙隆起不同部位,珠江组沉积古地貌依次由低到高,海侵淹没碳酸盐台地的时间依次由早到晚。因此,陆丰、惠州及流花地区碳酸盐台地消亡时间依次由早到晚,发育期次由少到多,厚度由小到大(图5)。

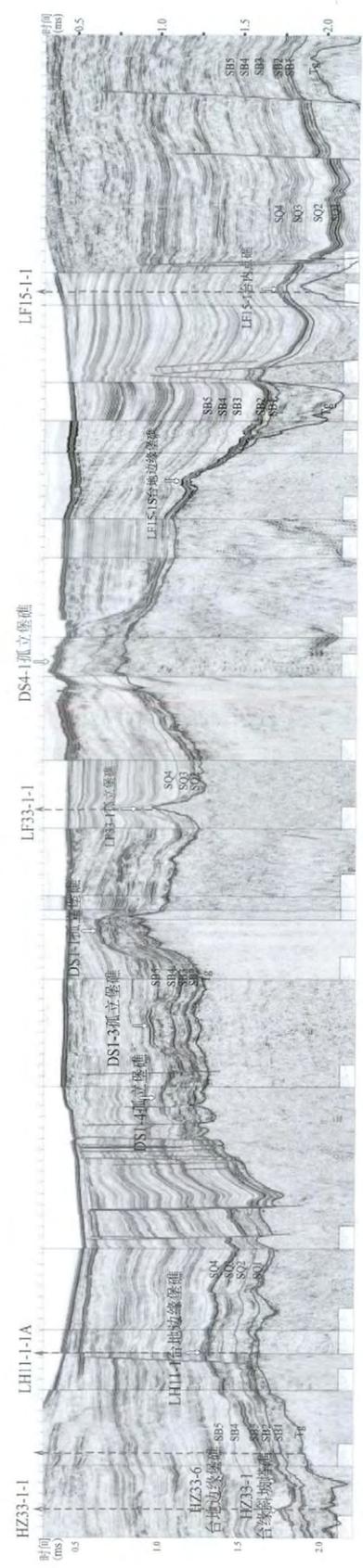
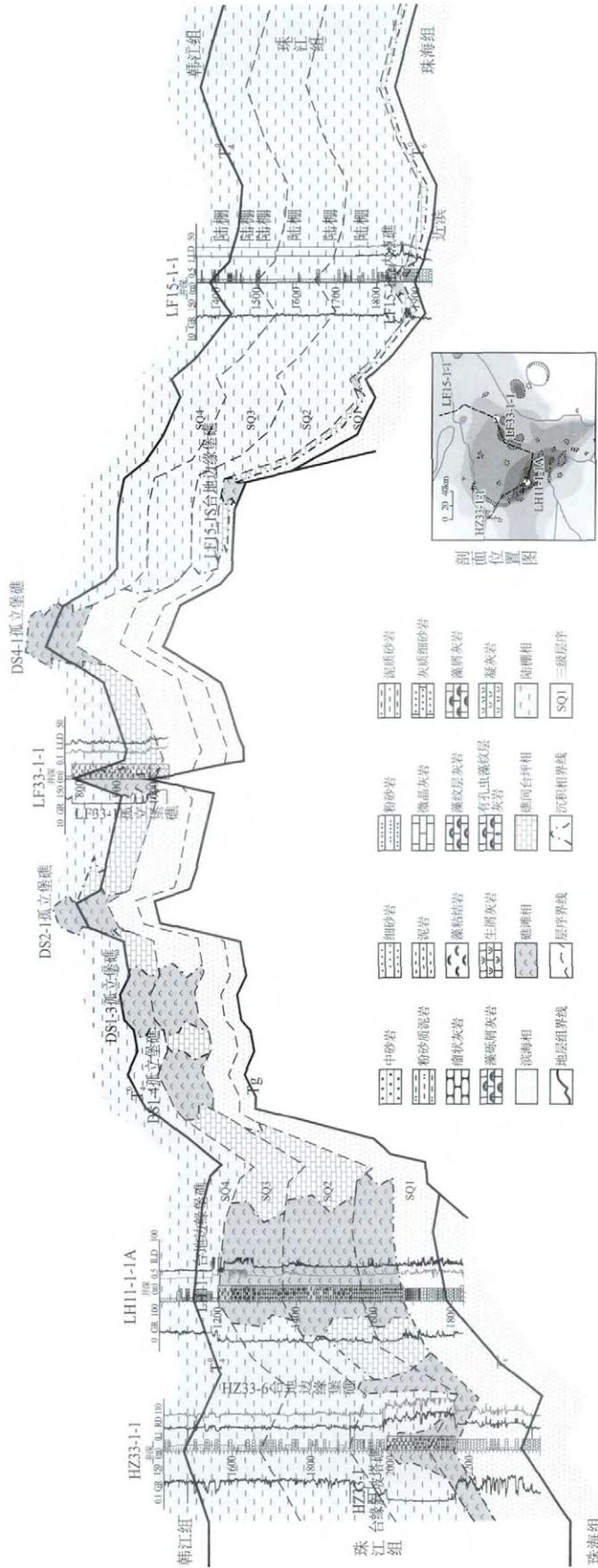


图5 东沙隆起惠州-流花-东沙-陆丰地区珠江组碳酸盐岩沉积特征  
Fig.5 Sedimentary characteristics of the carbonate rocks from the Zhujiang Formation in the Huizhou-Liuhua-Dongsha-Lufeng zone

## 4 生物礁及其它灰岩地震相特征

地震相参数包括几何参数和物理参数,前者包括外部几何形态和内部反射结构,后者包括反射波的振幅、连续性、频率等。几何形态可分为席状、丘形、箱型、透镜状、楔形以及不规则外形。内部反射结构形态划分为平行、亚平行、发散或收敛、前积、波状、杂乱或空白无反射等。振幅能量以灰岩顶界

正极强反射为标准,以下分中、弱和空白反射;频率以视频率 30~40Hz 为中频,之上为高频,之下为低频;连续性也是相对的,同相轴以 3~5km 的连续反射为中连续,大于 5km 为高连续,小于 3km 为低连续或差连续性。地震相的物理参数反映了沉积的具体特点,振幅反映层间波阻抗的差异性,连续性反映地层的连续性和沉积的稳定性,频率反映沉积速度。东沙隆起珠江组碳酸盐岩地震相特征见表 1。

表 1 东沙隆起珠江组碳酸盐岩地震响应特征

Table 1 Seismic responses of the carbonate rocks from the Zhujiang Formation on the Dongsha uplift

沉积相	代码	地震相特征描述
台地	I	席状,平行,强振幅,高连续,中-低频,多为双轨平行的强反射
礁	II <sub>1</sub>	丘形-箱形,顶部强振幅,高连续,内部为波状,有时见前积结构,翼部可见上超和披覆现象,底部可见上拉现象
	II <sub>2</sub>	低丘-透镜状,亚平行-波状结构,中振幅,中连续,中-低频
	II <sub>3</sub>	低丘-透镜状,内部为杂乱-空白结构,低-中连续,低-中频
滩	III <sub>1</sub>	席状-透镜状,亚平行结构,可见局部加厚的复合波,中-强振幅,中-高连续,中-低频
	III <sub>2</sub>	席状-透镜状,波状结构,中-弱振幅,中-低连续,中-低频
台坪	IV <sub>1</sub>	席状,长波状结构,中-弱振幅,中-低连续,中频
	IV <sub>2</sub>	席状,短波状-杂乱结构,弱振幅,低连续,中频

### 4.1 碳酸盐台地(未分台地与台缘)

东沙隆起珠江组碳酸盐台地包括了开阔台地及台地边缘内的台坪、礁、滩等亚相。由于碳酸盐岩密度和速度较上覆泥岩更大,碳酸盐岩顶面呈现出明显的强反射,连续性好,可实现大范围连续追踪。台地的整体地震相特征表现为席状,平行,强振幅,高连续,中-低频,多为双轨平行强反射。由于碳酸盐岩在流花、惠州和陆丰地区的厚度分布不同,其在地震剖面的响应特征也有所差别,其中流花、惠州地区碳酸盐岩台地内可划分出次一级的沉积相单元,如礁、滩、台坪等,而陆丰以及部分反射厚度很薄的地区,则不能划分出次一级沉积单元。三个地区的碳酸盐岩台地整体面貌不同,可作为东沙隆起不同时期碳酸盐岩发育的典型代表。

#### 4.1.1 流花地区碳酸盐岩台地

流花台地厚度最大,主体厚度大于 300m,最大厚度 563m。台地西南边缘为断裂陡崖(陡坡),东北边缘碳酸盐岩呈阶梯状生长(缓坡),加之台地顶面强反射与上覆泥岩弱反射明显分开,因此整个台地外形轮廓清晰,易识别。由于灰岩顶强反射屏蔽部分能量,而灰岩间阻抗差减小导致反射能量减弱,台地内部表现出中-弱振幅至空白反射。受灰岩非均质性的影响,台地内部连续性降低(图 6A)。

#### 4.1.2 惠州地区碳酸盐岩台地

惠州台地厚度较流花台地薄,但厚度多大于

100m。惠州台地西北缘晚期台地与早期台地呈明显的阶梯状过渡,可见上超现象,加之灰岩顶界面具有强反射,所以台地轮廓清晰可见。台地内灰岩多呈层状分布,反射能量较顶部灰岩减弱,强-中振幅、高-中连续、中-低频,局部空白反射。其中早期台地底部反射界面不明显,但晚期主体台地顶底反射界面相对较明显(图 6B)。

#### 4.1.3 陆丰地区碳酸盐岩台地

陆丰台地整体厚度较小,厚约 30m,只有一个高连续的强振幅(图 6C)。

### 4.2 台坪

台坪(滩间、潟湖)以微晶灰岩为主。以波状反射结构为特点,席状、中-弱振幅、连续性相对较差,中频。其地震响应特征因为波状结构的不同可分为两种,以长波状结构为主(图 7A),短波状次之(图 7B)。

### 4.3 生物礁

生物礁的地震响应有明显的特殊外形特征。由于礁体的规模和类型不同,其反射外形各有差异,但总体轮廓以丘形、箱型、低丘-透镜状为特征。

礁顶界反射由于与上覆泥岩的阻抗差较大,常显示为强振幅。上覆地层主要为陆棚泥岩,上超和披盖现象明显。礁底界反射相对较弱,但除后期火山影响外均可见礁底界反射。

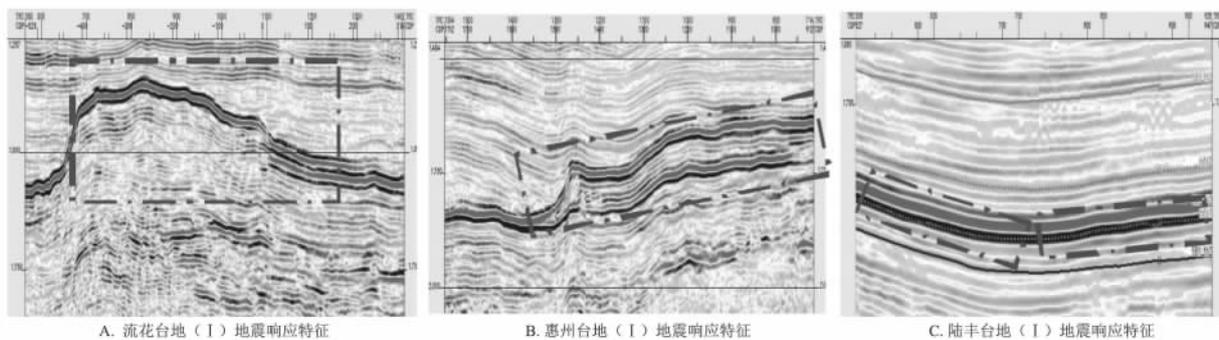


图6 东沙隆起珠江组碳酸盐台地地震响应特征

Fig. 6 Seismic responses of the carbonate platforms from the Zhujiang Formation on the Dongsha uplift

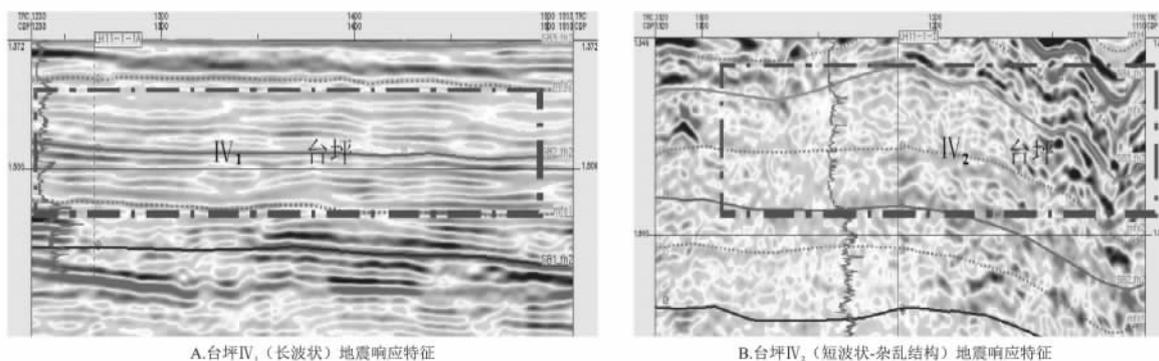


图7 东沙隆起珠江组台坪地震响应特征

Fig. 7 Seismic responses of the platform flats from the Zhujiang Formation on the Dongsha uplift

若台地较厚(如流花台地),早期发育的生物礁被后期的滩相或台坪灰岩覆盖,由于上覆围岩的屏蔽作用以及岩性本身物性相差小,反射能量会降低为中-弱振幅。内部反射特征常归纳为杂乱-空白或平行的弱反射,但具有多种内部反射结构,主要可分 $II_1$ 、 $II_2$ 、 $II_3$  3种类型(表1)。

$II_1$ 型为主要地震相,表现为丘形-箱形,顶部强振幅、高连续,内部为波状、有时见前积结构,翼部可见上超和披覆现象,有的底界反射可见上拉现象(如HZ33-1-1礁)。 $II_1$ 型生物礁规模大,具有多个成礁期,地震响应特征明显,内部反射结构清晰。可划分出生物礁发育期次,推断古水流和古风向和海平面升降,是东沙隆起珠江组最具代表性的生物礁类型,多为台地边缘堡礁。

$II_2$ 、 $II_3$ 型为次要地震相。 $II_2$ 表现为低丘-透镜状,亚平行-波状结构,中振幅,中连续,中-低频。 $II_3$ 表现为低丘-透镜状,内部为杂乱-空白结构,低-中连续,低-中频。 $II_2$ 、 $II_3$ 型发育少,规模也相对较小,地震响应特征有时与滩相难以区分,同时和后期构造、火山穿刺的地震反射相混杂,给判识带来一定风险。

#### 4.3.1 LH11-1 台地边缘堡礁

LH11-1 台地边缘堡礁是流花台地最典型的生物礁,其地震响应特征为低丘状外形,顶底反射界面均为强振幅、高连续,顶界面具有微弱起伏,底界面相对整齐。内部反射能量较弱,反射轴平行,振幅弱、连续性中等,呈杂乱至空白反射。LH11-1 礁的丘状外形及其强反射在剖面上与上覆泥岩和下伏中-弱振幅的碳酸盐岩(礁、滩及台坪灰岩叠合体)明显区分,极易识别(图8)。

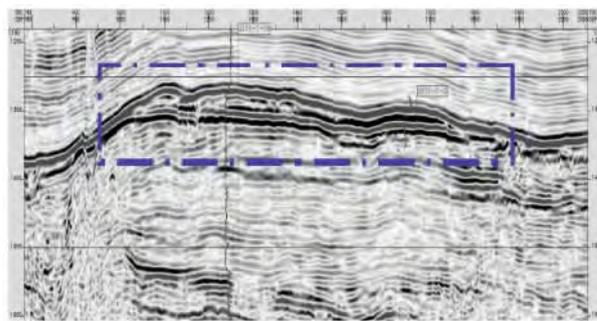


图8 东沙隆起 LH11-1 台地边缘堡礁地震响应特征

Fig. 8 Seismic responses of the LH11-1 platform-margin barrier reefs on the Dongsha uplift

### 4.3.2 HZ33-6 台地边缘堡礁( 黄瓜条礁)

HZ33-6 堡礁发育在惠州台地西部边缘,呈条带状延伸,因形似而俗称黄瓜条礁。礁体的地震响应特征为单倾斜的块状前积体,顶界反射振幅强,但由于所处台地边缘尤其是礁缘斜坡受到海水波浪的侵蚀改造,其连续性在不同的台地边缘受到不同程度的影响。底界反射较统一,为早期灰岩底,振幅强、中连续。内部反射能量变化大,主要为中振

幅、低连续的前积反射结构,局部为杂乱至空白反射,中频。海平面缓慢下降时,礁体发育叠瓦状前积反射结构,礁缘斜坡反射连续(图 9A)。海平面缓慢上升-停滞期,礁体小规模纵向发育生长,但仍以侧向前积为主(图 9B)。礁缘斜坡受海浪侵蚀时,不具统一反射界面、连续性明显变差,礁体为中-强振幅,局部杂乱反射,是礁缘斜坡垮塌、侵蚀的响应(图 9C)。

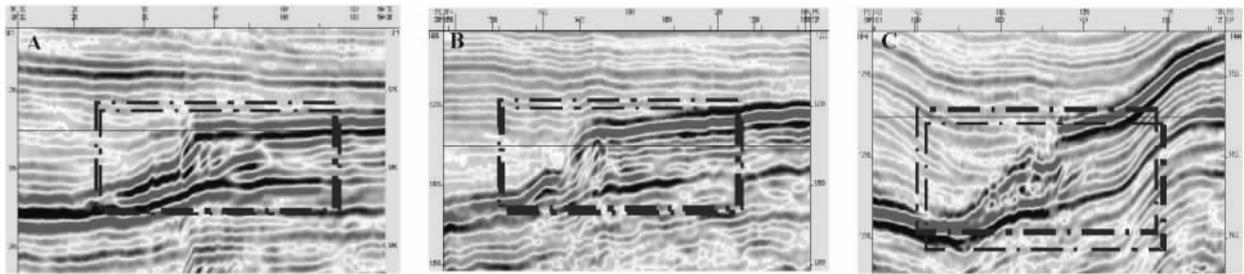


图9 东沙隆起 HZ33-6 台地边缘堡礁( 黄瓜条礁) 地震响应特征

Fig.9 Seismic responses of the HZ33-6 platform-margin barrier reefs on the Dongsha uplift

### 4.3.3 LF33-1 孤立堡礁

LF33-1 堡礁横向展布 3 ~ 5km,为珊瑚礁直接生长在火山岩上,是发育在火山基座上的孤立礁体,礁缘坡度较大,外形隆起呈明显的正地形,周围可见大量碎屑岩上超沉积,顶部见席状披盖。礁体具明显的近似多边形的丘状外形反射,振幅强、连续性好、同相轴界面光滑,与后期碎屑岩反射易区分,显示了礁的沉积环境稳定、清洁。底界反射不具有统一界面,振幅中等,连续性差,为近似叠瓦状的前积反射构型。内部反射能量降低,为中-弱振幅,中-低连续性。依据生物礁的发育期次可分为 A、B、C 期 3 期(图 10)。A 期以向上建造为主,见加积、双向下超反射结构,反映礁生长速率大于海平面上升速率,为海侵期礁,地震响应特征为弱振幅、低连续的短轴反射,反射频率低,弱成层性。B 期主要为向西单侧前积生长,是礁体主要侧向建造期,底部见下超反射,反映了海平面下降期(海退期)生物礁的生长特征,地震响应为楔形的中弱振幅、中连续性、中频,见近似强制海退的前积反射构型。C 期是礁体的最后一期生长,以纵向加积为特征,侧向发育极为有限,反映海平面快速上升,其上升速率大于礁的生长速率,地震响应特征为席状、中振幅、中连续、低频特征,局部为空白反射。

长(有的在珠江组沉积期之后还有发育),具有相同的海平面升降变化和古海洋气候条件,因此其生长发育模式、期次及其地震响应都具有相似的特征,均表现为早期海侵加积生长,晚期海退侧向前积生长,最后海侵淹没消亡。

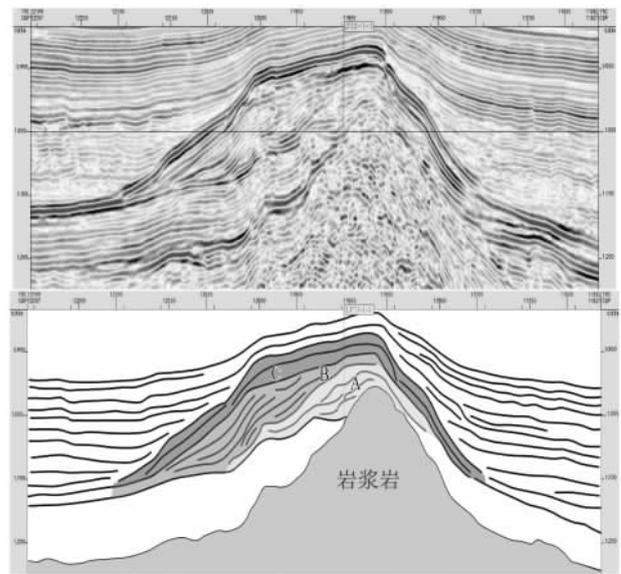


图 10 东沙隆起 LF33-1 孤立堡礁地震响应特征和反射波地震线描解释剖面

Fig.10 Sketch to show the seismic responses of the LF33-1 isolated barrier reefs

LF33-1 堡礁周围还发育多个规模较大的礁体,如 DS1-2、DS1-3、DS1-4、DS2-1 及 DS4-1 堡礁,形成分布面貌独特的孤立堡礁礁群。由于发育时期较

### 4.3.4 DS1-3 孤立堡礁

DS1-3 孤立堡礁规模较大,单条剖面礁体长度

11.21km。呈块状箱型,顶、底反射界面清楚,均为强振幅。顶界面反射尤为突出,为强振幅、高连续性。底界连续性好,能量稳定,推测为灰岩与下覆礁基反射界面,同时底界面可见大量下超反射。礁体内部反射能量整体降低,短轴、波状-杂乱-空白反射,连续性差,发育前积反射结构,局部反射很强。礁体内部根据生长期次分为A、B、C、D 4期,C期外围边界可见上超现象,该上超面即为礁体的轮廓面。其中A、B、C期主要为礁相,D期主要为台坪相但两侧发育小规模礁体,表现为环礁结构(图11)。

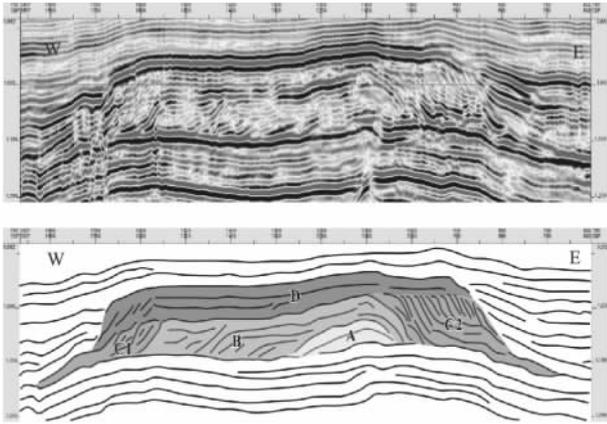


图11 东沙隆起 DS1-3 孤立堡礁地震响应特征和反射波地震线描解释剖面

Fig. 11 Sketch to show the seismic responses of the DS1-3 isolated barrier reefs

A期具有东陡西缓的特征,反射能量偏低,连续性中等,弱成层结构,主体以向上加积为主同时伴有向外围扩张的前积,为海侵期礁。B期礁体已具有明显的箱型或块状礁形态,横向延伸远,纵向起伏不大,顶部相对较平坦,整体东侧稍陡,礁生长发育极度不对称,向西大范围侧向前积生长,向东则延伸有限,同时也有向上的建造,反映了海平面上升速率减慢-停滞,具有高位期礁发育的地震响应特征。C期礁体是一连续的、围绕B期生长的环状生物礁,呈不对称发育,东侧明显较西侧发育,这一趋势与A、B期相反,反映了局部环境或古风向的变化。C1发育在西缘,轮廓明显,其弱振幅、低连续、杂乱至空白反射,向西前积发育。东缘C2侧向延伸范围更大,底部反射振幅较强、连续性好、频率较低,顶部前积现象更为明显,由S形前积过渡到斜交式前积,前积层同相轴长度呈递减趋势最终收敛至礁缘,反映强制海退期(低位期)礁的地震响应特征,该期顶部可能存在暴露溶蚀,有利于储层改造。D期较A、B、C期礁体的反射能量强,主要为中振

幅、连续性相对较好、中频,局部空白反射,成层性好,两端反射相对杂乱,有小规模礁体发育,中间推测为环礁内部的台坪相,局部发育礁后滩相,表现为环礁结构,整体反映海平面上升的响应特征。D期之后由于海平面快速上升,礁体纵向建造能力不足,最终被海平面上升淹没。

#### 4.3.5 LF15-1 台内点礁

LF15-1 台内点礁发育在 SQ1 期台地内部,成礁期次早,但发育时间短,厚度小(厚 37.5m),横向发育规模小。礁体地震响应特征为低丘状-扁豆状反射,中-强振幅、中连续性,高频,内部无反射(图12)。LF15-1 点礁是生物礁油藏,因此对这类小规模礁体或疑似礁体的发现和研究也很重要。

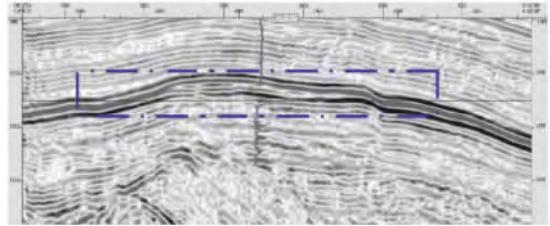


图12 东沙隆起 LF15-1 台内点礁地震响应特征

Fig. 12 Seismic responses of the LF15-1 intraplatform patch reefs on the Dongscha uplift

#### 4.3.6 HZ33-1 台缘斜坡塔礁

塔礁以纵向生长为主而横向延伸受限,因形似宝塔而得名。东沙隆起塔礁发育在台缘斜坡,环境水体整体偏深,礁体以追赶海平面的方式向上生长,其暴露时间和程度相较于台地边缘礁明显偏低。当海平面持续上升,最终淹没消亡。

HZ33-1 塔礁发育于台地前缘斜坡,是在前期更大规模的礁滩复合体基础上发展起来的。前期礁滩复合体地震响应特征为低丘状,强振幅,高连续性,由于厚度较薄,内部只具有一个同相轴,平行、中振幅,中连续性,高频反射。礁滩复合体具统一底界,与下伏砂岩阻抗差为负,因而为负相位(黑轴),同样为强振幅、连续性好。塔礁的两个阶梯状的响应特征,分别代表了礁体发育的两个期次。塔礁外部几何形态为高丘-塔形。顶界反射振幅强、连续性好,同相轴整洁、光滑。内部反射由于碳酸盐岩整体厚度较小加之礁体倾角较大,使得屏蔽后反射能量大幅降低,表现为弱振幅、中-低连续,低频,弱成层性,局部为空白反射。礁体呈明显的向上加积生长反射构型,且横向宽度缩减较快,反映了海平面上涨迅速,最终淹没消亡,被后期快速前积的

三角洲砂体充填掩埋(图 13)。

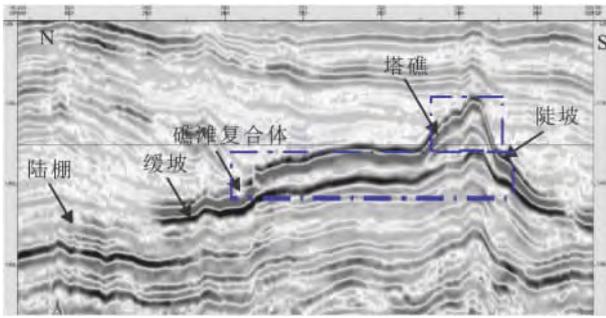


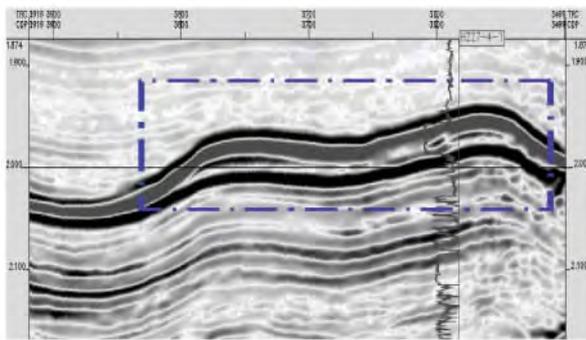
图 13 东沙隆起 HZ33-1 台缘斜坡塔礁及其扩展区域地震响应特征

Fig. 13 Seismic responses of the HZ33-1 foreslope pinnacle reefs on the Dongsha uplift

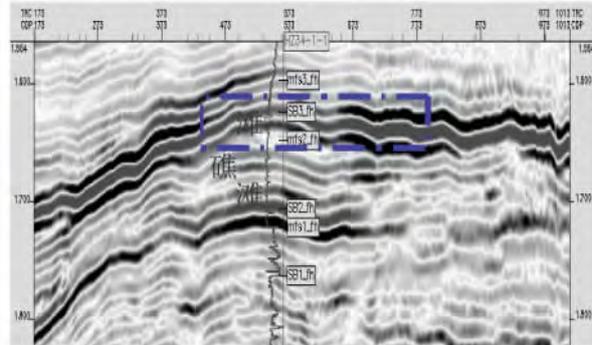
#### 4.4 生屑滩

滩是碳酸盐岩中较为重要的有利储集相带,属浅水高能相带,常发育在台地边缘或台内高地。滩

与礁有着密切联系,横向上与礁邻近,纵向上常与礁复合生长。由于滩自身不具有像礁一样的抗浪格架,其底质因水动力条件差异而处于移动状态,反射外形主要表现为席状、低丘-透镜状,连续性中等。其所处的高能环境海水循环良好,波浪作用强烈,颗粒分选、磨圆好,因而其波阻抗常较强,表现为中-强振幅,但在碳酸盐岩内部由于波阻抗差小和屏蔽作用表现为中-弱振幅。在厚度较大的流花台地,滩相表现出一定几何外形(如低丘-透镜状)或因特殊水动力条件局部发育前积或加积形态而礁体纵向建造不突出时与礁体难以区分,加之纵向上礁滩多叠合生长,可统称“礁滩相”。滩的其地震响应特征可主要分为两类,Ⅲ<sub>1</sub>为席状-透镜状,亚平行结构,可见局部加厚的复合波,中-强振幅,中-高连续,中-低频(图 14A);Ⅲ<sub>2</sub>为席状-透镜状,波状结构,中-弱振幅,中-低连续,中-低频(图 14B)。



A. HZ27-4 滩的地震响应特征



B. HZ34-1 滩的地震响应特征

图 14 东沙隆起生屑滩地震响应特征

Fig. 14 Seismic responses of the organic banks on the Dongsha uplift

#### 4.5 台地前缘斜坡

斜坡地震响应主要表现为楔状、亚平行结构、中-弱振幅、中-低连续、中-低频(图 15)。

斜坡在惠州和流花台地西部及西北部偏陡,而流花台地斜坡又陡于惠州台地斜坡,在东部及东北部则相对较缓。其中在流花台地南侧及西南侧斜坡上可见小规模塔礁,同时由于本身坡度较大和受频繁的构造活动影响,局部可见塌积现象。陆丰台地由于仅发育一期碳酸盐岩,且厚度相差不大,均较薄,并没有形成明显的斜坡地貌。

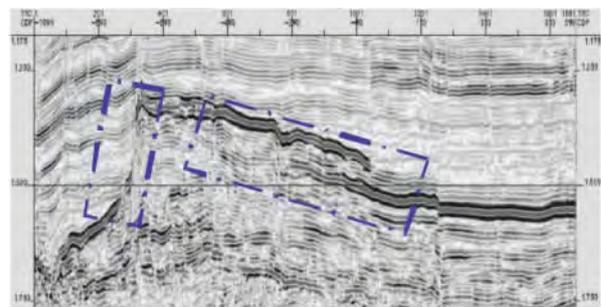


图 15 东沙隆起台地前缘斜坡地震响应特征  
流花台地西-东两侧两种不同的斜坡类型

Fig. 15 Seismic responses of the foreslopes on the Dongsha uplift

### 5 结论

(1) 东沙隆起珠江组礁灰岩主要为珊瑚藻礁灰岩,分骨架岩、粘结岩及障积岩。颗粒灰岩主要为生

屑灰岩,微晶灰岩伴生较多生屑。

(2) 东沙隆起珠江组生物礁发育在开阔台地、台地边缘及台地前缘斜坡 3 类沉积相中,分为台内

礁(点礁)、台地边缘堡礁(堤礁)和台缘斜坡塔礁,主要发育台地边缘堡礁。流花、惠州及陆丰地区由于古地貌及海侵时间的差异性,珠江组碳酸盐台地沉积厚度及发育时间存在明显的差异性,流花台地淹没消亡最晚厚度最大,陆丰台地淹没消亡最早厚度最小,惠州台地介于前两者之间。但流花、惠州及陆丰台地纵向沉积序列又表现出共同性,从下向上均可划分出3个沉积相单元,即滨岸相、碳酸盐台地相和陆棚相。

(3) 东沙隆起珠江组生物礁地震相主要表现为丘形-箱形,顶部强振幅、高连续,内部为波状、有时见前积结构,翼部可见上超和披覆现象;有时表现为低丘-透镜状、亚平行-波状结构、中振幅、中连续、中-低频,或低丘-透镜状、内部为杂乱-空白结构、低-中连续、低-中频。

#### 参考文献:

- [1] 陈长民、施和生、许仕策等. 东沙隆起第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 朱伟林、张功成、杨少坤等. 南海北部大陆边缘盆地天然气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- [3] 庞雄、陈长民、邵磊等. 白云运动-南海北部渐新统中新统重大地质事件及其意义[J]. 地质评论, 2007, 53(2): 146-150.
- [4] 施和生、秦成岗、高鹏. 珠江口盆地番禺低隆起-白云凹陷北坡天然气晚期成藏特征[J]. 中国海上油气, 2008, 20(2): 73-46.
- [5] 施和生、李文湘、邹晓萍等. 层序地层学在东沙隆起油田开发中的应用[J]. 中国海上油气(地质), 2000, 14(1): 15-20.
- [6] 刘军、施和生、杜家元等. 东沙隆起台地生物礁、滩油藏成藏条件及勘探思路探讨[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(1): 23-27.
- [7] 何家雄、陈胜红、刘海龄等. 南海北部边缘盆地地区地质与油气运聚成藏规律及特点[J]. 西南石油大学学报, 2008, 22(5): 91-98.
- [8] 孙珍、庞雄、钟志洪等. 珠江口盆地白云凹陷新生代构造演化动力学[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 489-498.
- [9] 魏喜、邓晋福、谢文彦等. 南海盆地演化对生物礁的控制及礁油气藏勘探潜力分析[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 245-252.
- [10] 魏喜. 南沙海域断裂系统对含油气盆地的控制[J]. 海洋科学, 2005, 29(6): 66-68.
- [11] 何炎、胡平忠. 南海东沙隆起早中新世生物礁中的大有孔虫[J]. 古生物学报, 1995, 34(1): 18-39.
- [12] 范嘉松. 中国生物礁与油气[M]. 北京: 海洋出版社, 1996.
- [13] 姚伯初、曾维军等. 中美合作调研南海地质专报[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994.

## Geological and seismic characteristics of the organic reefs on the Dongsha uplift, Zhujiangkou Basin

LIU Li-hua<sup>1</sup>, WANG Rui-liang<sup>1</sup>, FU Heng<sup>2</sup>, LU Jing<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Branch, CNOOC, Shenzhen 518067; Guangdong, China; 2. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

**Abstract:** The reef limestones in the Zhujiang Formation on the Dongsha uplift may be classified into three types: framestone, bindstone and bafflestone developed in the open platform, platform-margin and foreslope facies, and composed of the intraplatform patch reefs, platform-margin barrier reefs and foreslope pinnacle reefs, respectively. During the early stages of the deposition of the Zhujiang Formation, the littoral sandy deposits were initiated on the Dongsha uplift, followed by the rimmed shallow-water carbonate platforms during the middle stages. During the late stages, the carbonate platforms were gradually drowned and consumed by transgressions, and then the shallow shelf muddy deposits were accentuated. Among the carbonate platforms, the Liuhua platform has a maximum thickness of 563 m, and displays strongly seismic reflection on the topmost part while moderate-weak amplitudes and reflection and poor continuity in the interior of the platforms. The Huizhou platform with a thickness of more than 100 also displays strongly seismic reflection on the topmost part while strong-moderate amplitudes, high-moderate continuity and moderate-low frequency and locally blank reflection in the interior of the platforms. The Lufeng platform only with a thickness of about 30 m exhibits highly continuous strong amplitudes. The seismic reflection configurations generally display the mound, box, low hills-lenticular forms. The onlapping and draping can be observed as well.

**Key words:** Dongsha uplift; Zhujiang Formation; organic reef; seismic reflection