

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.06.014

南海北部珠江口盆地深水区碳酸盐岩发育特征及地震识别

周小康¹, 卫哲¹, 傅恒², 吴婷婷¹, 梁杰¹, 曾驿¹, 李颖薇¹

1. 中海油深圳分公司研究院, 广州 510240

2. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059

摘要: 由于南海的多次扩张、拉伸、消减运动, 在珠江口盆地白云深水区发生了陆架裂陷和海水入侵等地质现象, 形成了海相碳酸盐岩生长发育的基础地质条件。对珠江口盆地深水区碳酸盐岩的发育地质背景、地质特征、发育规律、地震响应特征以及深水区灰岩发育的主控因素进行了探讨, 结果表明白云深水区主要发育两种类型的碳酸盐台地: 古隆起镶边台地以及火山建隆孤立台地。台地沉积主要发育在古隆起周缘、构造高部位、火山隆起周缘, 并被钻井所证实。在白云深水区东沙隆起西南缘、云荔低凸起、荔湾凹陷北缘、荔湾凹陷南缘及顺鹤隆起发育典型的生物礁, 钻井证实有珊瑚、红藻、苔藓虫等造礁生物。生物礁地震特征具有强的连续反射顶、底界面, 丘状反射外形, 内部结构或空白、或杂乱, 具有前积、加积、退积等层序结构。

关键词: 碳酸盐岩; 发育特征; 地震识别; 深水区; 珠江口盆地; 南海北部

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

Development characteristics and seismic identification of carbonate rocks in the deep-water area of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea

ZHOU Xiaokang¹, WEI Zhe¹, FU Heng², WU Tingting¹, LIANG Jie¹, ZENG Yi¹, LI Yingwei¹

1. Research Institute, Shenzhen Branch of CNOOC Ltd, Guangzhou 510240, China

2. School of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Due to multiple spreading and subduction of the South China Sea, some geological phenomena may be observed in the Baiyun deep water area of the Pearl River Mouth Basin, such as multiple continental shelf rifting and sea water intrusion. After integrated analysis, the geological characteristics, development pattern, seismic response characteristics and main controlling factors affecting carbonate sedimentation in the deep water area of the Pearl River Mouth Basin are discussed in this paper. Drilling results confirm that platforms commonly developed in the periphery of paleo-uplift, structure high and volcanic uplift margin, thus there are two types of platforms in the Baiyun deep water area, the rimmed platforms on paleo uplifts and the isolated platforms on volcanic highs. Hermatypic organism like corals, red algae and bryozoans have been found in some typical reefs on the southwestern margin of the Dongsha uplift, Yunli low uplift, the northern margin of Liwan sag, and the southern margin of Liwan sag and Shunhe uplift. The reefs have clear seismic reflection characteristics, for example strong and continuous top and bottom, domal seismic reflection, blank or disordered inner reflection structure and progradational and aggradational as well as retrogradational reflection sequences.

Key words: carbonate rocks; development characteristics; seismic identification; deep-water area; the Pearl River Mouth Basin; Northern South China Sea

目前珠江口盆地经过 30 多年的勘探, 现已发现碳酸盐岩油田 5 个, 含油构造 3 个, 储量规模 2.5 亿 t, 展现了良好的勘探前景。前人针对珠江口盆

地东沙隆起浅水区碳酸盐岩的研究表明, 本区在近系珠江组具有发育大规模碳酸盐岩台地的构造、沉积背景和石油地质条件^[1-5]。“十一五”、“十二五”

资助项目: 国家自然科学基金十二五国家重大专项海洋深水区油气勘探关键技术子课题“南海北部深水区碳酸盐储层识别技术与评价”(2011ZX05025-003-003); 国家自然科学基金项目“南海北部淹没碳酸盐台地发育演化及混合沉积研究”(91228208)

作者简介: 周小康(1981—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事油气勘探开发科研工作, E-mail: zhouxk@cnooc.com.cn

收稿日期: 2018-08-31; **改回日期:** 2018-10-25. 文凤英编辑

在古近纪古新世,珠江口盆地深水区(白云深水区)同珠一坳陷一样处于弧后拉张环境,受古南海第 2 期的俯冲-拖曳-消减作用影响,形成了多组正向和反向断裂分割成的多个半地堑,充填陆相湖盆地层。古新纪恩平世,陆壳快速减薄,湖盆由“断陷分隔”,形成统一的大断拗湖盆,并开始在地南缘局部位位置发生小规模的海侵,珠一坳陷还没有发生海侵。

古近纪渐新世时期,古南海已经关闭,深水区受新南海第 1 期扩张作用的影响,开始接受比较大规模的海侵事件,形成了海陆过渡相到浅海陆架相—陆坡深水沉积体系,此时珠一坳陷更靠近内陆而发生海陆过渡的滨海沉积。该期是白云深水区碳酸盐岩初次较大规模发育的时期。

中新世深水区进一步沉降,逐步演变为陆坡深水环境。23.03Ma 陆架坡折带位于南部隆起带附近,随着沉降加速,坡折带向北跃迁,到 21.0Ma 陆架坡折带稳定在白云凹陷北坡^[8,9]。在白云凹陷发育大型盆底扇和斜坡扇。具有强烈下切特征的峡谷

水道主要发育在凹陷北缘和西部断裂发育区^[16-18]。该期也是白云深水区碳酸盐岩镶边台地、火山建隆周缘碳酸盐岩台地较发育时期。

拗陷期粤海—万山组开放陆坡深水泥质沉积从 10.5Ma 至今海侵程度增强,陆架三角洲向海方向推进受到限制,沉积作用明显向北迁移,白云凹陷的沉积速率大大降低,只有少量的细粒或泥质沉积物进入到白云深水区,沉积以泥质为主,演变成单斜的开放陆坡环境^[17,18]。

2 单井地质发育特征

白云深水区钻井 85 口,碳酸盐岩井段钻厚 0.51~317m,其中共有 52 口钻井钻遇碳酸盐岩,分布在白云凹陷、番禺低隆起、云开低凸起、云荔低凸起和南部隆起带(图 3),主要发育在恩平组、珠海组及珠江组。由于钻井资料过多,仅选取 B1、B2 两口单井对白云深水区碳酸盐岩发育地质特征进行分析。

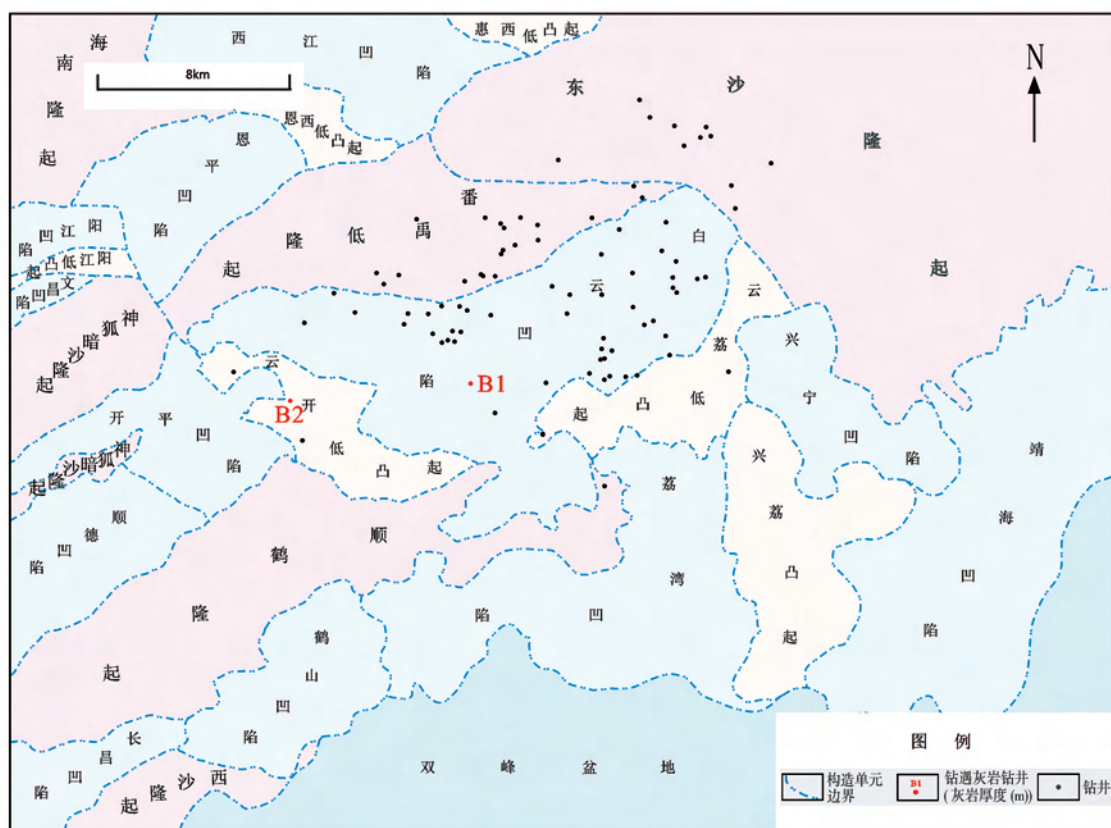


图 3 白云深水区碳酸盐岩采样钻井分布图

Fig.3 Distribution map of sampling sites for carbonate in Baiyun deep water area

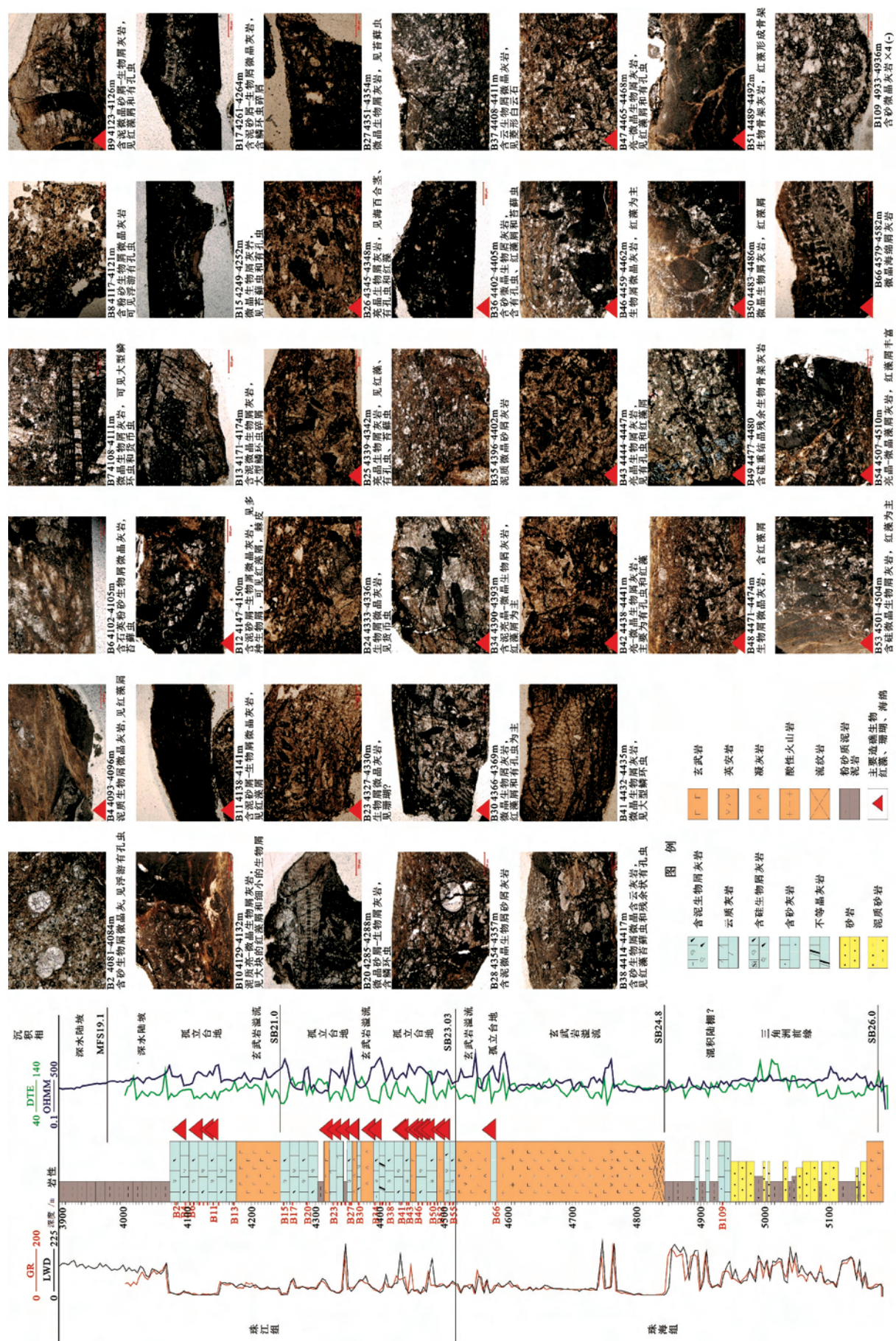


图 4 白云深水白云凹陷B1钻井地质特征
Fig.4 Carbonate lithology of well B1 in the Baiyun Depression of the Baiyun deep water area

2.1 B1 井

B1 位于白云凹陷中部,水深达 1036m。B1 灰岩总厚 355m,主要分布在珠海组和珠江组,是白云深水区少数存在礁灰岩的钻井。

B1 缺失神狐组(地震资料),新生代沉积演化经历了:①文昌组—恩平组中深湖泥质(烃源岩)沉积(地震资料);②珠海组三角洲前缘砂质沉积(地震、钻井资料);③珠海组—珠江组孤立碳酸盐台地(钻井资料);④珠江组—韩江组—粤海组—万山组深水陆坡泥质沉积(钻井、地震资料)4 个阶段。

B1 珠海组(4870~4519m)主要为玄武岩,夹流纹岩、凝灰岩、英安岩、中—酸性火山岩。中间层段多处见结晶灰岩,如含硅粉—细晶灰岩、细—粉晶灰岩、含云巨—粗晶灰岩、细—粉晶灰岩及泥质细晶白云岩,见造礁生物海绵,反映 B1 火山建隆在珠海组顶部开始发育孤立台地,并出现生物礁、生屑滩、砂—砾屑滩。(图 4)

珠江组下段(4519~4075m)主要为孤立台地灰岩沉积。夹玄武岩、凝灰岩、酸性火山岩或中—酸性火山岩。珠江组灰岩见较多低能沉积的(含)颗粒微晶灰岩,也见较多高能及较高能沉积的亮晶生屑灰岩、微晶生屑灰岩、亮晶砾屑—砂屑灰岩,见造礁生物珊瑚、红藻、苔藓,含浮游有孔虫、底栖有孔虫等,反映 B1 火山建隆在珠江组发育的孤立台地也存在生物礁、生屑滩、砂—砾屑滩。珠江组上段以及韩江

组—粤海组—万山组以浅灰、浅黑色泥岩为主,为淹没孤立台地的深水陆坡泥质沉积(图 4)。

B1 井微量元素 V/Ni 和 Sr/Cu、稀土元素 Th/U 及常量元素 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 在 SB24.8、SB23.03、SB21 等 3 个界面附近有较明显的反应(图 5)。V/Ni 值从陆相到海相不断减小(可由海岸 2.31 降低到深海 1.13),界面附近该值变化较大,由高值(2~3.5)突变到低值(1±),反映了界面附近暴露(低位体系域)—海侵(海侵体系域)的沉积序列。Sr/Cu 值大于 10 属干热气候(反映海相咸水),界面附近多小于 10 属温湿气候(反映大气淡水改造)。Th/U 值界面附近也为突变。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 值多为 4 以下低值,属干旱气候(咸水),界面附近局部尖突高值属于温湿气候(大气淡水改造)。

2.2 B2 井

B2 井新生代沉积演化与 B1 井类似(图 6)。

B2 井揭示珠海组(3120~2834m)岩性主要为浅灰色泥质粉砂岩、浅灰色薄层砂岩、深灰色粉砂质泥岩,为三角洲前缘粉砂质沉积,GR 中值;夹玄武岩、微晶灰岩,为混积陆棚沉积。珠江组(2750~2135m)主要为玄武岩,GR 低值微齿状;玄武岩中夹薄层状灰岩及砂泥岩,灰岩岩性为含海绿石含泥砂质有孔虫灰岩、含有孔虫和海百合茎的微晶灰岩、生物屑灰岩等,砂泥岩岩性主要为含海绿石含有孔虫含泥砂质粉砂岩等;微晶灰岩见造礁生物珊瑚、红藻

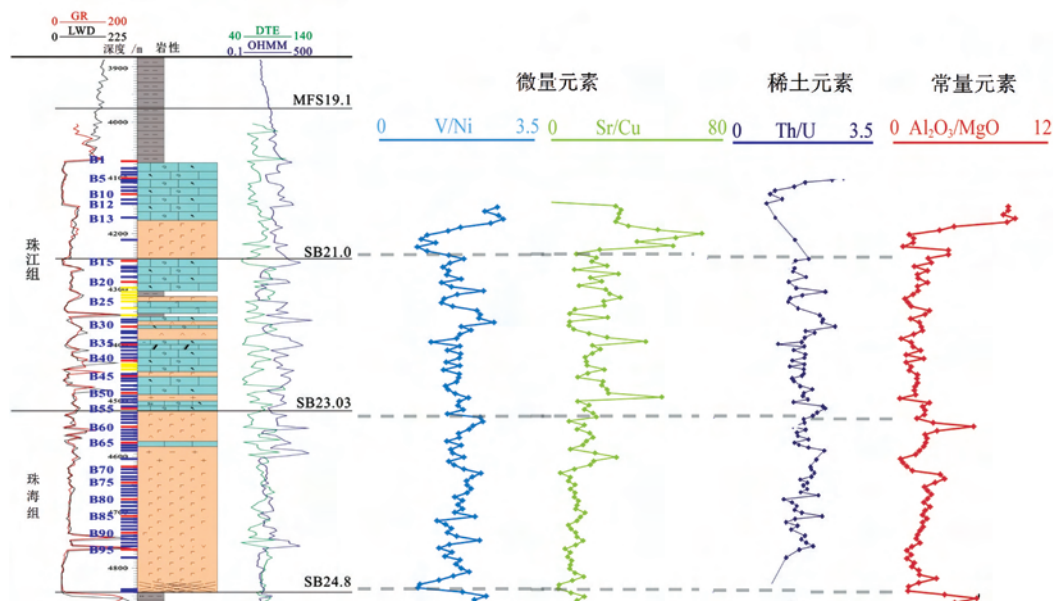


图 5 白云深水区白云凹陷 B1 灰岩段微量元素、稀土元素及常量元素特征

Fig.5 Geochemical characteristics of trace elements, rare earth element, major element of the limestones from B1 section of Baiyun Depression in Baiyun deep water area

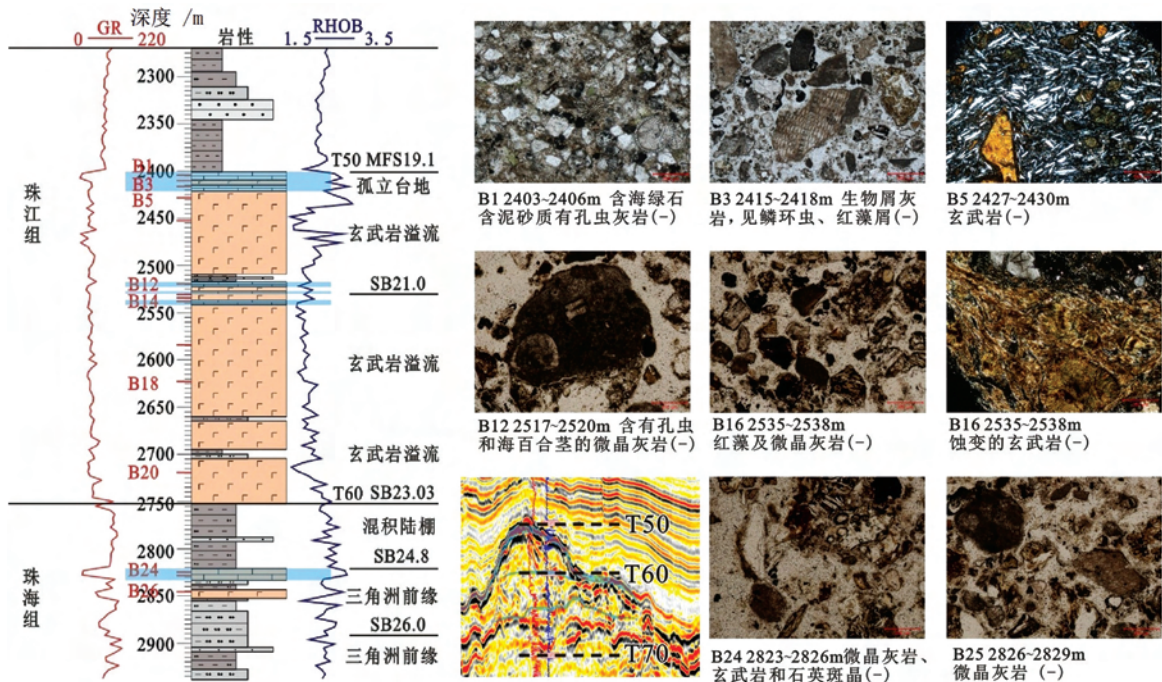


图 6 白云深水区云开低凸起 B2 钻井灰岩段地质及地震特征

Fig.6 The geological and seismic characteristics of B1 limestone section on Yunkai lower uplift in Baiyun deep water area

及苔藓虫碎屑(图 6)及红藻屑,反映 B2 火山建隆在珠江组发育的孤立台地存在生物礁、生屑滩。珠江组灰岩顶(2400m 之上)为灰色泥岩、粉砂岩,反映 B2 珠江组孤立台地被淹没而出现混积的过程。珠江组-韩江组-粤海组-万山组为深水陆坡泥质沉积。

3 地震识别及分布特征

前人对珠江口盆地浅水区碳酸盐岩台地利用地震相面法对外部形态(席状、箱型、丘状、不规则等)、内部结构(如振幅、频率、连续性等)及物理参数进行仔细分析对比,取得了许多认识^[14],对比中生代、古生代碳酸盐岩台地发育特征^[19,20],发现其具有明显的独特性。而深水区发育的碳酸盐岩台地及生物礁更加具有比较特殊的几何、地震反射特征。在外部形态上,多呈丘状、箱型、透镜状、块状等。通常不具备成层性,呈现杂乱空白反射特征。受海平面升降影响,生物礁呈旋回性出现礁滩相互层,内部会出现前积、平行、波状等反射结构。深水区碳酸盐岩及生物礁顶部一般被海侵泥岩覆盖,其与灰岩形成巨大的波阻抗差异,常具有光滑连续的强反射界面。另外,由于生物礁与周围沉积体厚度之间的差异,两翼沉积物会上超于生物礁之上,依据上超点可确定生物礁的范围。碳酸盐岩台地底部一般呈光滑明显反射,但是常常因火山活动穿刺作用而出现断续、模糊反射。

3.1 碳酸盐岩台地地震识别

白云深水区主要发育两种类型的碳酸盐台地,一类是古隆起镶边台地,另一类是火山建隆孤立台地。

(1) 古隆起镶边碳酸盐台地

古隆起镶边碳酸盐台地具有面积大、厚度小(多小于 50m)的特点,但其台内、台缘、斜坡生物礁厚度明显加大(50~100m)。白云深水区有利于碳酸盐岩及生物礁发育的古隆起多为古近系大面积岩浆岩建隆,主要发育在东沙隆起、云荔低凸起东南部及顺鹤隆起(图 7),镶边台地就分布在这些古隆起边缘或之上。

东沙隆起镶边碳酸盐台地分布在东沙隆起向白云凹陷的自然延伸区域,台缘之上碳酸盐台地厚度相对较大,台缘之下混积陆棚厚度较薄,分布范围广(图 8)。碳酸盐台地主要发育在珠江组下段,台缘之下混积陆棚发育在珠江组顶部,此处恩平组-珠海组发育了强反射-低频厚度较大灰岩,为海侵初期隆起边缘镶边碳酸盐台地,分布范围较为局限,仅在隆起区分布。向西逐渐过渡为深水碎屑岩沉积,珠江组灰岩在其强振幅、内部空白杂乱反射消失位置尖灭。

云荔低凸起东南部镶边碳酸盐台地具有与东沙隆起类似的成礁条件,薄层台地相灰岩在古隆起基底之上广泛分布,灰岩主要发育层位为恩平组(图 9)。

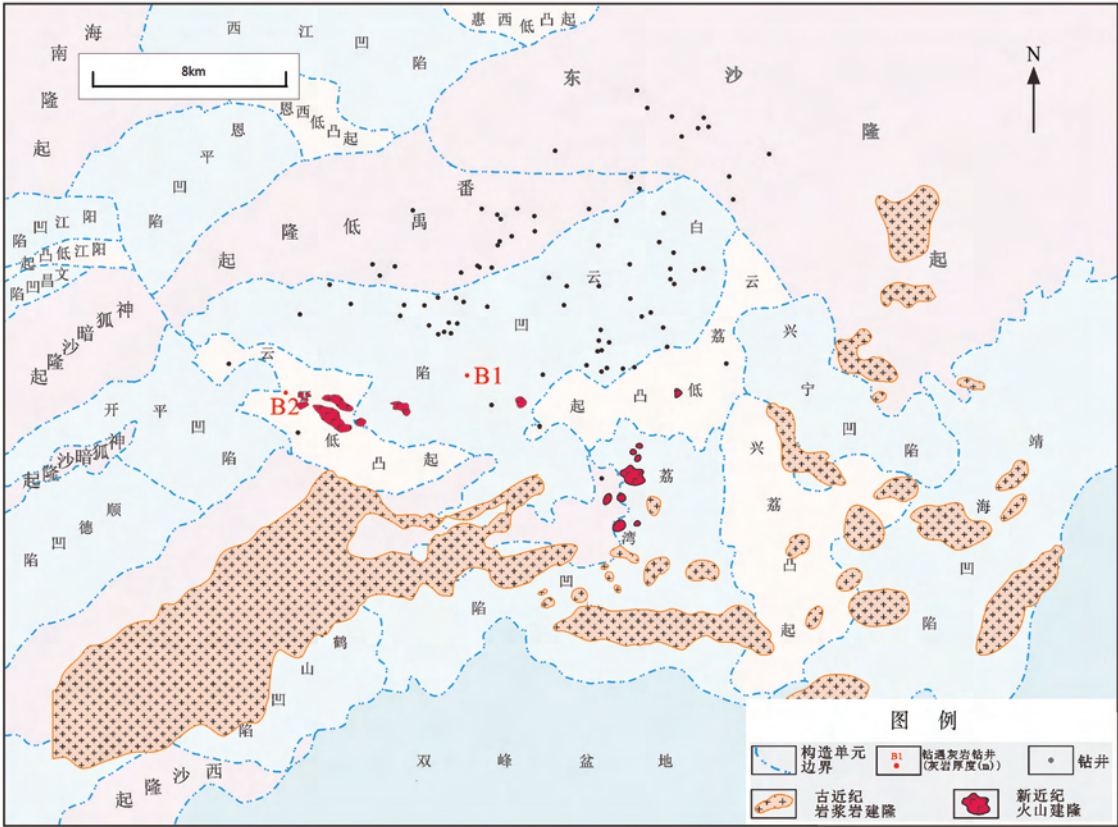


图 7 白云深水区古近纪岩浆岩建隆和新近纪火山建隆

Fig.7 The Palaeozoic igneous and Neogene volcanic build-ups in Baiyun deep water area

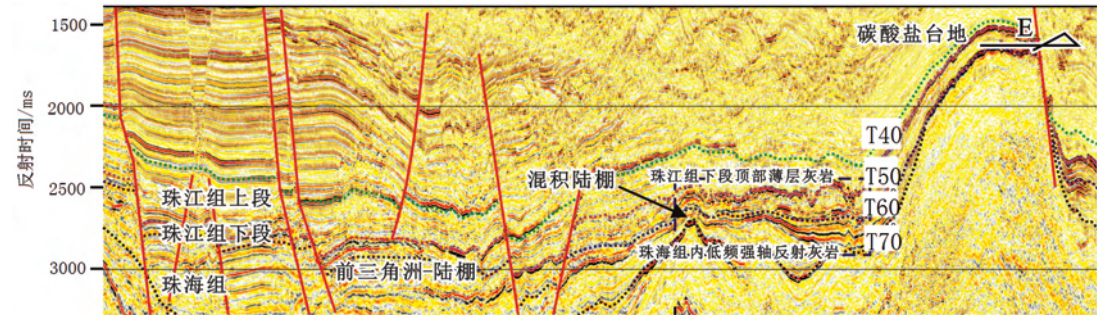


图 8 白云深水区东沙隆起西南部镶边碳酸盐台地地震响应特征

Fig.8 Seismic characteristics of a rimmed carbonate platform in southwest Dongsha uplift of Baiyun deep water area

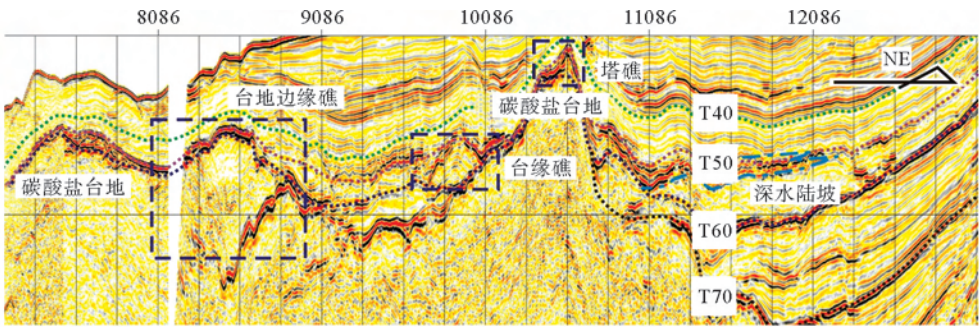


图 9 白云深水区云荔低凸起东南部镶边碳酸盐台地地震响应特征

Fig.9 Seismic characteristics of a rimmed of carbonate platform in southeast Yunli lower uplift of Baiyun deep water area

台地两侧均为相对深水的碎屑岩沉积,台地内部灰岩反射特征明显,为光滑平直的较强反射轴,台地内部有相对构造低,灰岩强反射消失,指示了台间凹陷的灰岩缺失。灰岩段表征为连续强反射轴,见弱前积反射,向两翼碎屑岩沉积转换位置表现为强振幅尖灭,同时台地边缘发育台地边缘生物礁,其南东方向碳酸盐岩陆棚位于荔湾凹陷内部,发育疑似斜坡生物礁,特征较为明显。

顺鹤隆起镶边碳酸盐台地在地震剖面上反映为两根较强反射轴,以隆起边界断层作为台地边缘,在云开低凸起发育混积陆棚。在此台地上搜索出的生物礁相对较少。

(2) 火山建隆孤立碳酸盐台地

火山建隆孤立碳酸盐台地具有面积相对较小、厚度相对较大(多大于 100m)的特点。白云深水区孤立碳酸盐台地多发育在古近系小面积火山建隆之上。典型的有 B-1 孤立台地、云荔低凸起西南部孤立台地和荔湾凹陷西北部孤立台地。

B-1 孤立台地发育在珠海组顶部及珠江组内部,分布范围限于火山岛周缘(图 10)。剖面上两翼坡度很大,灰岩尖灭部位同相轴明显减弱,中部同相轴下凹部位为明显火山口,靠近火山口部位受岩浆影响严重,内部出现空白反射。

云荔低凸起西南部孤立台地生物礁多与岩浆岩伴生(图 11)。该孤立台地发育在珠海组及珠江组底部,相对宽缓,为较强反射轴,内部见杂乱空白反射,并且底界面见同相轴的双向下超,灰岩在隆起区斜坡带强反射轴减弱及内部空白反射消失部位尖灭,两翼地层上超于强轴包络面之上。

荔湾凹陷西北部孤立台地主要发育层位在珠海组及珠江组下段底部。珠海组沉积初期,该火山隆起暴露,珠海组沉积中后期,该隆起被海水淹没,具明显“上拱”丘形体,为疑似孤立堡礁发育部位,向两翼同相轴振幅明显降低部位疑为碳酸盐岩建造结束部位,地震特征类似于云荔低凸起西南部孤立台地。

3.2 典型生物礁地震识别

在白云深水区东沙隆起西南缘、云荔低凸起、荔湾凹陷北缘、荔湾凹陷南缘及顺鹤隆起见较为典型的生物礁。

(1) 东沙隆起西南缘生物礁

东沙隆起南缘发育 3 个面积较大的生物礁,位于东沙隆起向南延伸带。①号生物礁位于台缘斜坡带上,表现为块状,顶底界面为连续强轴,内部亚平行一空白反射,中连续、低频,见低角度前积,其东部明显受火成岩影响呈杂乱的模糊带。②号生物礁位

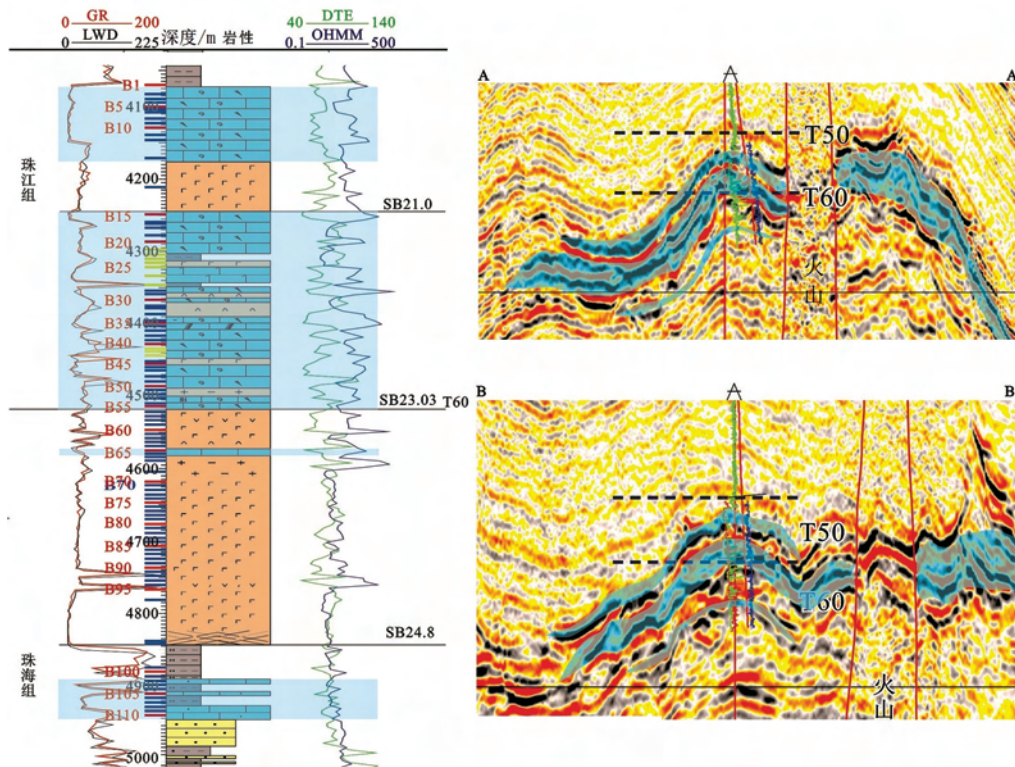


图 10 白云深水区白云凹陷 B1 灰岩段过井地震特征

Fig.10 Seismic characteristics of B1 limestone section of Baiyun depression in Baiyun deep water area

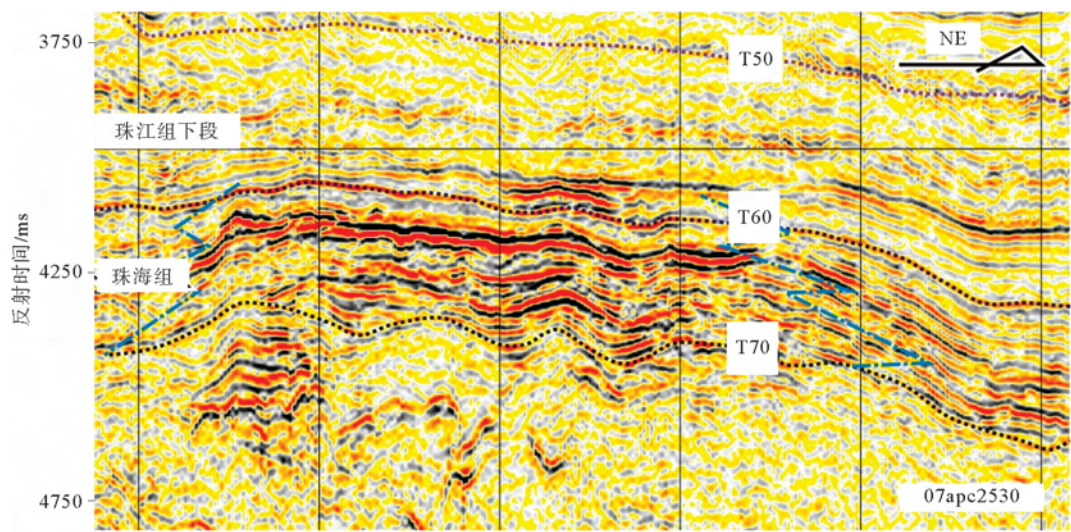


图 11 白云深水区云荔低凸起西南部孤立碳酸盐台地地震响应特征

Fig.11 Seismic characteristics of an isolated carbonate platform in southwest Yunli lower uplift, Baiyun deep water area

于台缘带上,表现为楔形,顶底界面均为光滑、干净强反射界面,内部同相轴能量中等,表现为低角度前积,生物礁受到火山基底持续抬升的影响而侧向迁移。③号生物礁位于台缘带内侧,与①号生物礁类

似(图 12)。

(2)云荔低凸起生物礁

南部隆起带云荔低凸起西南部由于受新生代火山影响十分严重,灰岩、碎屑岩与火成岩混杂(图 13)。

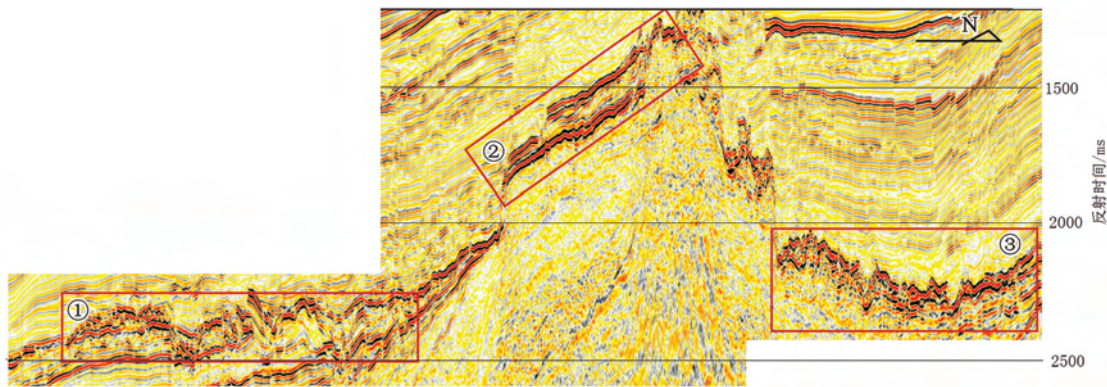


图 12 白云深水区东沙隆起西南缘台缘-斜坡生物礁地震响应特征

Fig.12 Seismic characteristics of the Platform edge - slope reef in southwest Dongsha uplift, Baiyun deep water area

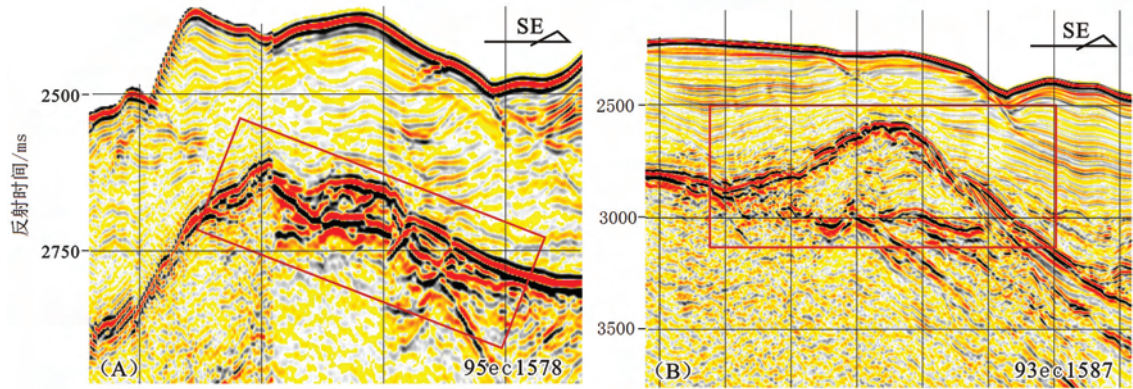


图 13 白云深水区云荔低凸起南部生物礁地震响应特征

Fig.13 Seismic characteristics of the reef in south Yunli lower uplift, Baiyun deep water area

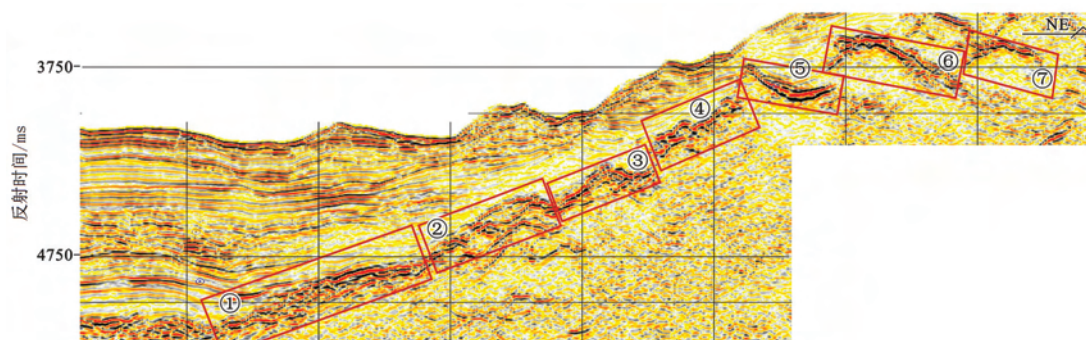


图 14 白云深水区荔湾凹陷南缘生物礁地震响应特征

Fig.14 Seismic characteristics of the reef in south Liwan Sag, Baiyun deep water area

剖面(A)为台地内部点礁,地震上呈低丘反射外形,顶底界面干净、清晰,内部反射能量相对较低,具杂乱—前积反射结构。剖面(B)生物礁发育在古隆起边缘,外形为丘状,为古隆起台地边缘堡礁,其顶界为平行—亚平行强反射轴,上覆海侵层披覆于其上,底界受基底隆起影响,为中—弱振幅的强反射轴,内部杂乱—前积—空白反射结构,可见生物礁垂向建造和侧向(东南侧)前积。

(3) 荔湾凹陷南缘生物礁

荔湾凹陷南缘发育了一个比较典型的生物礁群(图 14),呈阶梯状分布于基底古隆起侧翼的缓坡带上,最终发育到古隆起顶部,共发育了 7 个期次的生物礁,呈追补生长特征。

7 个期次生物礁发育特征相似,均具较明显丘状或低丘状或透镜状礁形,礁体顶部强反射,内部杂乱—空白反射,中—低连续。①号礁最早发育,⑦号最晚,可见明显上超反射,反映了海平面的逐步上升对生物礁生长的影响,最终形成了期次连续的生物礁群。

4 发育规律及主控因素

国内对于南海早中新世碳酸盐岩的研究止步于 20 世纪 90 年代。近年来,在“十一五”、“十二五”的支持下,延续前人研究成果后又重新开展了一系列工作,取得了较大的进展。珠江口盆地深水区碳酸盐岩的发育规律同古生代和中生代碳酸盐岩相比,既存在很多共性的地方,又因为特殊的构造演化背景,导致其具有一定独特性。

(1) 珠江口盆地碳酸盐岩是在南海的扩张、消减的构造背景下生长形成的。随着海侵的不断加大,海平面不断上升,适合碳酸盐岩生长的隆起范围逐渐减小,导致碳酸盐岩发育面积从深水区逐渐向台

地隆起高地不断溃缩,呈不断退积的特征。

(2) 珠江口盆地处于被动大陆边缘的裂隙区,深水构造区更是在南海扩张时期快速沉降变为陆坡乃至深水环境,没有形成大型、巨型碳酸盐岩台地的先天条件。由于强烈的快速拉张、掀斜作用,仅仅形成了一些古近世小规模基岩隆起,碳酸盐岩往往生长发育于古隆起的边缘。

(3) 深水区在南海的第 2 次快速扩张期,海平面上升极为迅速,陆壳急剧减薄,海底火山活动尤为剧烈。火山活动在带来大量营养物质的同时,也形成了海底高地,为碳酸盐岩的生长发育提供了良好的地质场所。期间围绕火山生长发育,与火山沉积物间歇互层沉积成为一大特色地质现象。

5 结论

(1) 白云深水区随着南海的 2 期扩张构造运动开始发育碳酸盐岩台地及生物礁建造。白云深水区存在较为广泛的灰质沉积。在火山建隆和构造继承性高部位往往发育灰岩和凝灰岩、玄武岩等火山岩的交互沉积。

(2) 白云深水区碳酸盐岩生物礁主要分布在东沙隆起西南缘、云荔低凸起、荔湾凹陷南缘,主要发育的层位在珠海组及珠江组,主要发育的类型为碳酸盐台地(含生物礁)和混积陆棚沉积。

(3) 深水区发育的碳酸盐岩台地及生物礁在外部形态上,多呈丘状、箱型、透镜状、块状等,通常不具备成层性,呈现杂乱空白反射特征。受海平面升降影响,生物礁呈旋回性出现礁滩相互层,内部会出现前积、平行、波状等反射结构。地质体的顶部具有光滑连续的强反射界面,底部常常被火山通道刺穿而形成模糊带。其中古隆起镶边台地范围发育广,主要在古隆起边缘发育,呈条带状分布,内部平行空

白反射,底部平滑,而火山建隆孤立台地厚度大,以丘型为主,面积相对较小,呈散点与火山相关分布,底部模糊断续。

建议针对白云深水区碳酸盐岩开展层序地层研究,以体系域为单元编制沉积相平面图,精细查明碳酸盐岩目标体时空分布及碳酸盐岩储层分布。建议继续针对碳氧同位素、微量元素、稀土元素及常量元素反映SB24.8、SB23.03、SB21这3个界面附近存在的疑似3次暴露及大气淡水改造,进行灰岩储层发育特征研究。

参考文献 (References)

- [1] 周小康,汪瑞良,曾驿,等. 珠江口盆地东沙隆起珠江组碳酸盐岩层序地层及沉积模式[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(9): 1-6. [ZHOU Xiaokang, WANG Ruiliang, ZENG Yi, et al. Carbonate sequence stratigraphy and sedimentary modes of Dongsha Massif in Pearl River-mouth Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(9): 1-6.]
- [2] 黄海平,傅恒,周小康,等. 珠江口盆地(东部)珠江组碳酸盐岩层序地层及储层分布[J]. 沉积学报, 2012, 30(2): 291-300. [HUANG Haiping, FU Heng, ZHOU Xiaokang, et al. Sequence stratigraphy and reservoir distribution of carbonate of Zhujiang Formation in the eastern Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(2): 291-300.]
- [3] 陈骥,傅恒,刘雁婷,等. 珠江口盆地东沙隆起珠江组沉积环境及演化[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(2): 21-26. [CHEN Ji, FU Heng, LIU Yanting, et al. The Sedimentary environment and evolution of Zhujiang formation in Dongsha uplift of Pearl-River Mouth Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(2): 21-26.]
- [4] 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): 22-27. [LIU Jun, SHI Hesheng, DU Jiayuan, et al. Forming conditions and exploration direction of reef oil-gas pool in carbonate platform of Dongsha Massif[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2007, 26(1): 22-27.]
- [5] 邱燕,王英民. 南海第三纪生物礁分布与古构造和古环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1): 65-73. [QIU Yian, WANG Yingmin. Reefs and paleostructure and paleoenvironment in the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(1): 65-73.]
- [6] 米立军,柳保军,何敏,等. 南海北部陆缘白云深水区油气地质特征与勘探方向[J]. 中国海上油气, 2016(2): 10-22. [MI Lijun, LIU Baojun, HE Min, et al. Petroleum geology characteristics and exploration direction in Baiyun deep water area, northern continental margin of the South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2016(2): 10-22.]
- [7] 朱伟林. 南海北部深水区油气地质特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 521-527. [ZHU Weilin. Petroleum geology in deepwater area of northern continental margin in South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 521-527.]
- [8] 王永凤,李冬,王英民,等. 珠江口盆地深水区油气储层发育规律及勘探方向. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(3): 143-150. [WANG Yongfeng, LI Dong, WANG Yingmin, et al. Deepwater oil-gas reservoir distribution pattern and its bearing on further exploration of pearl river mouth basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(3): 143-150.]
- [9] 徐少华,王英民,何敏,等. 珠江口盆地陆坡类型及其对深水储层的控制[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5): 982-992. [XU Shaohua, WANG Yingmin, HE Min, et al. Slope types and their controlling effects on deep-water reservoir in the Pearl River Mouth basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(5): 982-992.]
- [10] 王永凤,王英民,李冬,等. 陆架边缘三角洲沉积特征研究及其油气意义[J]. 海洋地质前沿, 2011(7): 28-33. [WANG Yongfeng, WANG Yingmin, LI Dong, et al. Depositional characteristics of shelf-margin deltas and their petroleum significance[J]. Marine Geology Frontiers, 2011(7): 28-33.]
- [11] 张功成,李友川,谢晓军,等. 南海边缘海构造旋回控制深水区烃源岩有序分布[J]. 中国海上油气, 2016(2): 23-36. [ZHANG Gongcheng, LI Youchuan, XIE Xiaojun, et al. Tectonic cycle of marginal sea controls the ordered distribution of source rocks of deep water areas in South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2016(2): 23-36.]
- [12] 张功成,屈红军,刘世翔,等. 边缘海构造旋回控制南海深水区油气成藏[J]. 石油学报, 2015(5): 533-545. [ZHANG Gongcheng, QU Hongjun, LIU Shixiang, et al. Tectonic cycle of marginal sea controlled the hydrocarbon accumulation in deep-water areas of South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015(5): 533-545.]
- [13] 朱伟林,吴景富,张功成,等. 中国近海新生代盆地构造差异性演化及油气勘探方向[J]. 地学前缘, 2015(1): 88-101. [ZHU Weilin, WU Jingfu, ZHANG Gongcheng, et al. Discrepancy tectonic evolution and petroleum exploration in China offshore Cenozoic basins [J]. Earth Science Frontiers, 2015(1): 88-101.]
- [14] 刘昭蜀,赵岩,李希宗,等. 珠江口盆地的扩张旋回及其与含油气性的关系[J]. 热带海洋, 1995, 14(3): 8-14. [LIU Zhaoshu, ZHAO Yan, LI Xizong, et al. Spreading cycle and relation to the hydrocarbon potential of zhujiang river mouth basin[J]. Tropic Oceanology, 1995, 14(3): 8-14.]
- [15] 何家雄,张伟,卢振权,等. 南海北部大陆边缘主要盆地含油气系统及油气有利勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2016(6): 943-959. [HE Jiaxiong, ZHANG Wei, LU Zhenquan, et al. Petroleum system and favorable exploration directions of the main marginal basins in the northern South China Sea[J]. Natural Gas Geoscience, 2016(6): 943-959.]
- [16] 庞雄,陈长民,彭大钧,等. 南海珠江深水扇系统的层序地层学研究[J]. 地学前缘, 2007, 14(1): 220-229. [PANG Xiong, CHEN Changmin, PENG Dajun, et al. Sequence stratigraphy of Pearl River Deep-water Fan System in the South China Sea [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(1): 220-229.]
- [17] 庞雄,申俊,袁立忠,等. 南海珠江深水扇系统及其油气勘探

- 前景[J]. 石油学报, 2006, 27(3): 11-15.[PANG Xiong, SHEN Jun, YUAN Lizhong, et al. Petroleum prospect in deep water fan system of the Pearl River in the South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 11-15.]
- [18] 刘丽华,汪瑞良,傅恒,等.珠江口盆地东沙隆起生物礁地质及地震特征[J].沉积与特提斯地质,2014,34(4):1-12.[LIU Li-hua WANG Ruiliang FU Heng, et al. Geological and seismic characteristics of the organic reefs on the Dongsha uplift, Zhujiangkou Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2014(04):1-12.]
- [19] 曾洪流.地震沉积学译文集[M].朱筱敏,等译.北京:石油工业出版社,2011: 1-14.[ZENG Hongliu. Seismic Sedimentology Translation Set[M].Zhu Xiaomin, et al. Trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011:1-14.]
- [20] 杨波,张昌民,李少华,等.珠江口盆地大型丘状地质体地震相分析及地质解释[J].石油学报,2014(1): 37-49.[YANG Bo,ZHANG Changmin,LI Shaohua, et al. Seismic facies analysis and geological interpretation of large-scale mounds in Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014(1): 37-49.]