

# 生物礁内部地震反射特征的地质解读及 以体系域为单元的层序地层学认识

——以珠江口盆地生物礁为例

黄诚<sup>1,2</sup>, 傅恒<sup>1,2</sup>, 房晓璐<sup>1</sup>, 陶碧娥<sup>1</sup>, 刘雁婷<sup>1</sup>

(1 成都理工大学能源学院; 2 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室)

**摘要** 通过分析珠江口盆地东沙隆起生物礁生长方式对海平面变化的响应,归纳出不同时期礁体生长的几种可能的几何形态和相应的地震响应特征,并对生物礁内部地震反射特征进行地质解读,建立了成礁模式,获得以体系域为单元的生物礁层序地层认识,为层序划分和层位对比解释提供了较可靠的参考。

**关键词** 生物礁油气藏;地震反射特征;成礁模式;体系域;层序划分

**中图分类号**:TE111.3;P631.445 **文献标识码**:A

生物礁油气藏的储量约占世界油气探明储量的10%,这类油气藏具有丰度高、产能高的特点,一直是勘探家们重点探索的目标。南海特殊的地理位置非常适合生物礁的生长。随着珠江口盆地流花4-1、流花11-1等一系列生物礁油藏的发现,该地区的生物礁勘探开发取得了重大突破,生物礁一度成为南海油气勘探的首选目标,但由于海区内的钻井数量较少,缺少充分的地质学、岩石学、古生物学和地球化学等研究资料,勘探只能主要依靠地球物理资料。因此,准确识别生物礁在地震剖面上的反射特征成了众多勘探工作者最为关注的问题之一。

## 1 生物礁的地震反射特征

南海生物礁的地震反射特征在相关文献中均已述及,生物礁的反射特征可归结为直接标志和间接标志两类<sup>[1-4]</sup>。直接标志可分为外部形态和内部组成:外部形态主要表现为生物礁的丘状或透镜状凸起、礁体顶面强反射、礁体周缘的上超和绕射现象;内部组成主要表现为礁体内部的断续、杂乱或空白反射等特点。间接标志表现为礁体上覆地层的披覆

构造和礁体底部的上凸或下凹现象。上述地震反射特征作为识别生物礁的主要手段,已被广泛运用到地震解释当中,并在海区内识别出了一批较可靠的生物礁<sup>①</sup>。但从目前的认识来看,少有以体系域为单元,利用地震反射特征对单个生物礁进行层序地层分析,并建立相应的成礁模式。

## 2 以体系域为单元的生物礁层序地层学分析

生物礁是具有一定数量的原地造礁生物格架、能够抗击相应的风浪并在地形上常凸起的独立的碳酸盐沉积体<sup>[5]</sup>。礁体的形成和发育受到众多因素的影响,在其它因素相对稳定的情况下,其几何形态明显受到相对海平面升降变化的影响,海平面升降变化能导致生物礁改变自身生长方式,进而引起礁体内部形态的复杂变化。在不同体系域沉积时期,礁体的生长发育会随海平面的变化情况而有所不同,反映到地震剖面上,便有可能形成反射特征各异的地震标志,故对礁体内部地震反射特征的深入认识可为以体系域为单元的生物礁层序地层学研究提供一定的参考性意见。

收稿日期:2010-04-15; 改回日期:2011-01-07

黄诚:1985年生,2008年毕业于长江大学,现为成都理工大学硕士研究生。主要从事层序地层学及地震地层学研究。通讯地址:610059 四川省成都市成华区二仙桥东三路2号

① 胡平忠,谢衍兴,王金中.东沙碳酸盐台地第三纪生物礁(滩)型油藏勘探[R].南海东部石油公司,1990.

## 2.1 海侵体系域

海侵期生物礁的生长方式受到礁体生长和海平面上升相对速度的影响。

(1)当海平面缓慢上升时,上升速率与礁体生长速率相差不大,生物礁一直处在一个相对稳定的浅水环境。由于水体较浅,限制了礁体向上生长的速度而只能大量进行侧向生长(图 1a)。虽然礁体属块状格架地质体,不显沉积层理,但礁体的侧向多世代叠加生长仍可能在地震上有所响应<sup>①</sup>。故有时地震反射特征可表现为低角度的叠瓦状弱反射结构,顶部平缓而连续,平面上展布较远。由于受水体能量的影响,该类生长方式多发生在水体能量相对较小、水体流畅的礁后向开阔台地一侧,避免了海侵期向海一侧过高的波浪破坏作用。

(2)当海平面快速上升时,生物礁发生并进乃至追补式加积生长,直至水体过深而被淹死,并在礁顶沉积海相泥岩(图 1b)。礁体的世代生长由于是垂向叠置,其内部界面的地震响应因顶部能量遮挡而不太明显,对应的地震反射特征多为杂乱—空白反射。部分情况下可具有较明显的成层反射,但多为海侵时的短暂暴露所致。例如,曾母盆地 L 塔礁内部出现的层状反射,经钻井证实曾有过短暂暴露<sup>[6]</sup>。

## 2.2 高位体系域

高位期随着海平面的持续下降,礁体垂向生长再次受阻并发生暴露,改以侧向增生为主,形成岩相带近似层状更迭的复礁体(图 1c)。在时间剖面上见到数个高角度叠瓦状或 S 形复合反射体,向海方向呈阶梯状逐级侧向增生下降。在次级海平面频繁变化时期,可出现礁滩的交替发育而在地震上形成较好的成层性。生物礁因顶部遭受风化剥蚀和波浪破坏而在礁后形成礁坪生物碎屑滩,形成平缓、高连续的强反射特征。

## 3 典型礁的成礁模式及层序地层学分析

在对珠江口盆地东沙隆起带珠江组进行层位对比解释的过程中,于 LF33-1 井以西约 12 km 处发现较为典型的生物礁地震异常体。现以该生物礁为例,结合上述有关礁体内部反射特征的诸多规律性认识,对该生物礁内部各地震单元进行地质解读、预测生物礁的成礁模式并进行层序地层学分析。

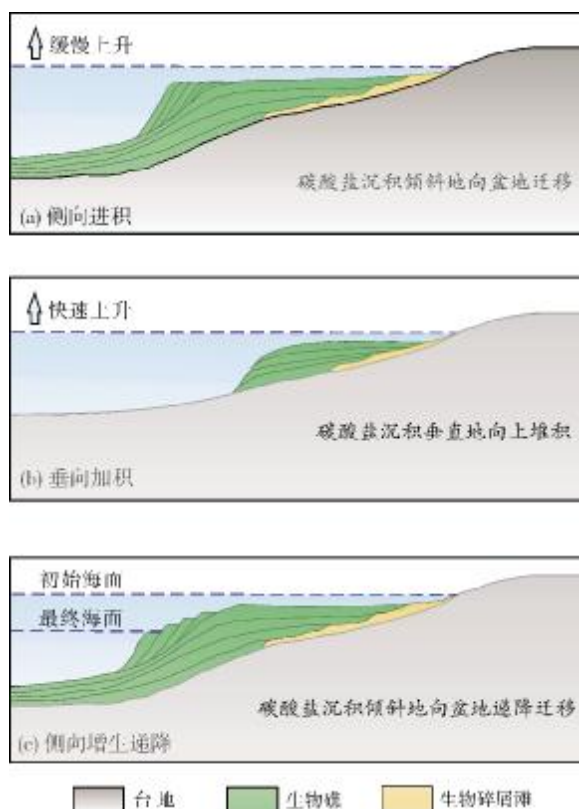


图 1 东沙碳酸盐台地生物礁生长模式图(据①改编)

## 3.1 典型礁的地震相特征及沉积相分析

根据生物礁内部各种不同反射特征,将该生物礁地震异常体划分为 12 个地震相单元,现分别对这 12 个地震相单元进行分析,并结合生物礁的生长规律和礁体的沉积模式将地震相特征转换为对沉积相的认识(图 2)。

① 单元为明显的亚平行、高连续的强反射轴,为生物礁底部碳酸盐硬底(或滩)构造。

② 单元呈弱丘状反射外形,内部反射成层性较弱,多为空白反射。因为礁核为块状抗浪格架,无沉积层理,在反射特征上一般表现为杂乱—空白反射,故推测该单元为礁核。

③ 单元为明显的低角度、叠瓦状弱反射,顶部为较连续的中强反射。据前人研究成果,东沙碳酸盐台地在早中新世中、晚期为缓慢上升阶段,为珠江组的主要成礁时期<sup>①</sup>。根据已取得的层位对比成果可知,典型礁的形成时期为早中新世中—晚期,因此符合缓慢海侵时生物礁侧向加积生长的条件,故推测为缓慢海侵时生物礁的侧向生长带。

④ 单元表现为具成层性的中弱反射特征。因为



在缓慢海侵阶段,浅水环境的生物礁常会受潮汐作用影响而受到破坏,破碎的生物碎屑被携带到礁后低能环境并沉积下来。由于生物碎屑颗粒分选较好,有时受水流作用影响可显示低角度或水平的沉积层理,由此推测该沉积单元可能为礁后朝向低能环境的过渡带。

⑤ 单元为强反射、高连续反射轴,呈箱型覆盖在下伏地震单元之上,推测为最大海侵时生物礁停止生长并接受陆棚泥沉积,与下伏碳酸盐岩形成强烈的波阻抗响应。

⑥ 单元由两组 S 形复合反射体组成,呈阶梯状逐级侧向增生下降。据前人成果得知,在早中新世晚期曾发生过一次较大规模的海退,海平面持续下降达 80~90 m,导致东沙碳酸盐台地大规模暴露<sup>[3]</sup>。由于此次大海退过程经历了多个次一级海平面升降旋回,故在礁体向海一侧发生了多次侧向增生下降。由此推测,该单元的两组 S 形复合反射体,即是大海退时期次一级海平面旋回下降阶段礁体在向海的一侧发生强烈进积作用的一种地震响应。

⑦ 单元处于两组 S 形复合反射体之间,为较连续的中强反射。推测为大海退时期次一级海平面上升时,由于外界环境有所改善,生物礁在短时期内再

度生长,随后又遭受暴露,停止发育。

⑧ 单元呈楔状外形,向礁核方向逐渐减薄,反射较强,高连续。因为其位于海侵侧积礁及礁后过渡带沉积物顶部,外形呈楔状向礁后台地一侧加厚,故推测为海平面快速下降后礁体暴露、遭受波浪破坏及风化剥蚀作用而在礁后形成的生物碎屑滩。

⑨ 单元表现为弱成层性,反射较弱,因其位于生物碎屑滩内侧,故推测为生物碎屑滩向潟湖的过渡环境,由于受水流作用影响而呈低角度层理。

⑩ 单元为一组高连续、高振幅的平行强反射轴,在其两侧上部见明显上超现象,推测为中中新世早期的快速海侵导致生物礁逐渐停止生长,并随后被陆棚砂泥所覆盖。该时期的海平面快速上升造成东沙台地几乎完全没入水中,仅局部地区发育若干小型的孤立台地<sup>[3]</sup>。

⑪ 单元为弱丘状外形,内部反射杂乱。因其处于礁前前积坡脚处,故推测为海退期礁前受波浪破坏而垮塌形成的生物碎屑角砾堆积物。

⑫ 单元具有较好的成层性,中—强反射,高连续。由于在层位对比过程中发现在典型礁相邻一侧亦发育有一个生物礁,两礁相隔约 5km,故推测该沉积单元为礁间潟湖沉积环境。由于礁间潟湖水动力条件较弱且两礁相距不远,受潮汐作用影响可发育

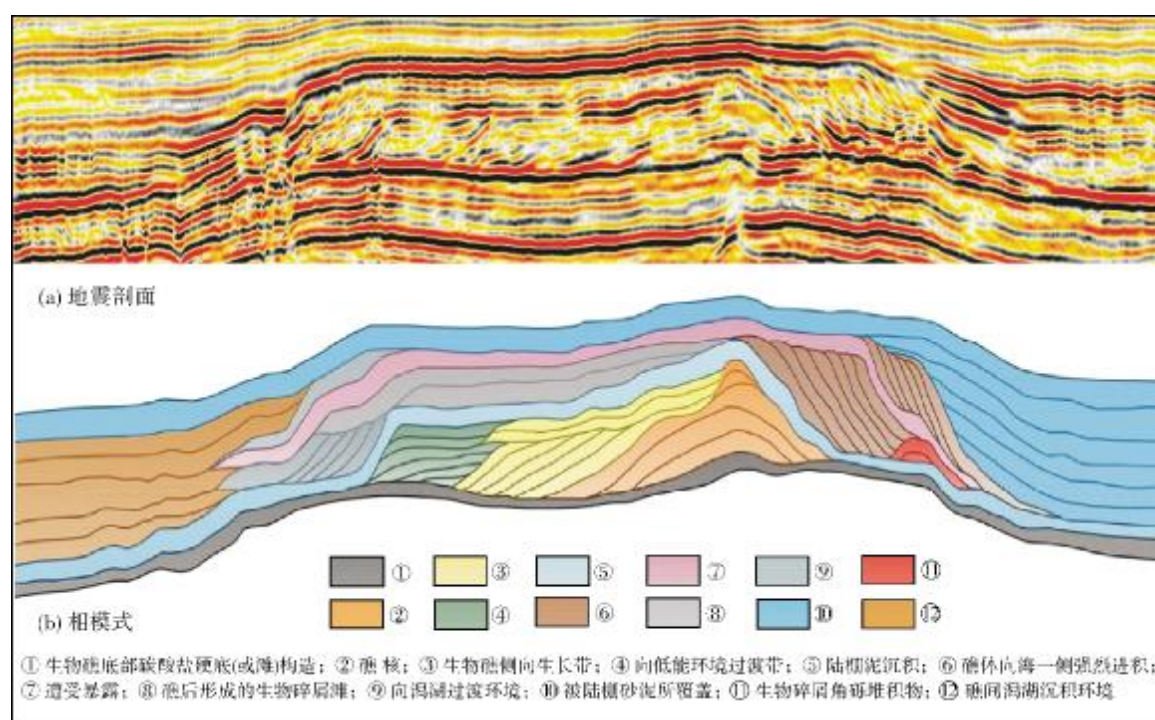


图2 典型礁的成礁模式图

细粒生物碎屑和灰泥的水平互层沉积,故可具有较好的成层性地震响应。

### 3.2 典型礁的成礁模式及层序地层学分析

通过对礁体沉积相地震相特征的认识,结合该地区相关的地质背景和已有的珠江组层序地层学研究成果,可预测出典型礁较为可靠的生长模式(参见图2)。

海侵初期生物礁首先在碳酸盐硬底之上迅速生长形成最初的礁核②;随后海平面缓慢上升,礁体向海一侧受波浪破坏作用只能垂向缓慢生长,向台地一侧由于水体环境适宜、营养物质丰富,生物礁迅速生长,但由于水体较浅,限制了礁体向上生长的速度而只能进行侧向生长③;侧积礁体内侧平缓带受水流影响,发育近水平层理的礁后过渡带沉积物④;随着海平面持续上升礁体最终停止生长,并很快被泥岩覆盖⑤;进入高水位期后,随着海平面的持续下降,生物礁开始再度生长,由于礁体向海一侧相对较陡,存在相对充足的可容空间,礁体向海逐级侧向增生下降⑥;在此期间经由短暂的次级海侵影响,生物礁可在垂向上短暂发育⑦;随后继续强烈进积生长,由于礁体的持续暴露,受风化剥蚀和波浪破碎影响,大量的生物碎屑颗粒被携带到礁后,形成平面展布面积较广的礁后生物碎屑滩⑧;而在生物碎屑滩后侧则发育向礁间潟湖过渡的沉积物⑨;随后新一轮的海侵出现,生物礁停止生长,并很快被陆棚砂泥岩所覆盖⑩。

由上可知,在东沙碳酸盐台地早中新世中—晚期的主成礁期,生物礁在海侵期和高水位期对应的沉积相特征可分别产生不同的地震响应。海侵初期生物礁多发育于碳酸盐硬底(或滩)之上,故层序底

界面多表现为中强反射的地震响应,有时可因海平面缓慢上升发生礁的侧向加积而在底界面之上产生低角度的叠瓦状地震响应。高水位期由于海平面持续大幅下降,在礁体向海一侧强烈进积而显示高角度叠瓦状或S形复合反射特征,部分生物礁可在礁后因水流作用形成不同角度倾斜层理的生物碎屑滩,亦可产生一定角度的叠瓦状地震响应,故叠瓦状或S形复合反射的底超面即为最大海泛面。中中新世早期的新一轮海侵导致主成礁期的绝大多数生物礁死亡,并被陆棚砂泥覆盖,故主成礁期绝大多数生物礁顶部高连续的强反射轴即为该海侵旋回的顶界面。

依此原则,对典型礁进行层序划分,并向四周进行层位对比解释,分别在典型礁两侧的未知礁W和LF33-1礁得到较一致的地震响应和测井响应(图3)。

W礁体内部可主要划分为4个地震相单元(图4),单元①表现为低凸起外形,其内部呈杂乱—空白反射,为典型的礁核地震响应;单元②为较明显的叠瓦状反射,推测为海退期礁后具倾斜层理的生物碎屑滩;单元③和④则分别为W礁的顶底地震响应。故依上述原则,单元②的底超面和单元①的顶部强反射面即为W礁内部的最大海泛面,这恰与层位对比结果相吻合。

据郭建宇等<sup>[1]</sup>,LF33-1礁为典型环礁,并已由钻井LF33-1-1证实。通过对LF33-1礁测井曲线分析,发现该井电测曲线存在规律性响应(图5a)。图5a中的①、③井段双侧向曲线表现为钟形、正向齿形或微齿化状,曲线值整体偏高,幅度为中—低值,包络线具一定程度后积式特征,表明该时期沉积的碳酸盐岩层遭受孔隙改造的影响逐渐降低,孔隙流体响应

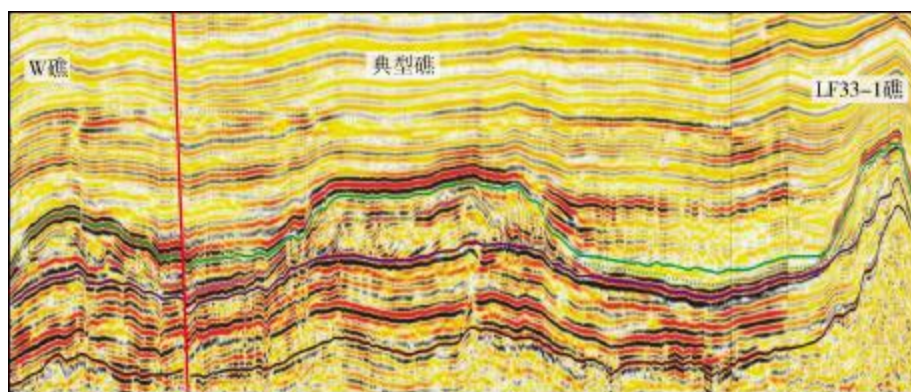


图3 典型礁的层位对比解释



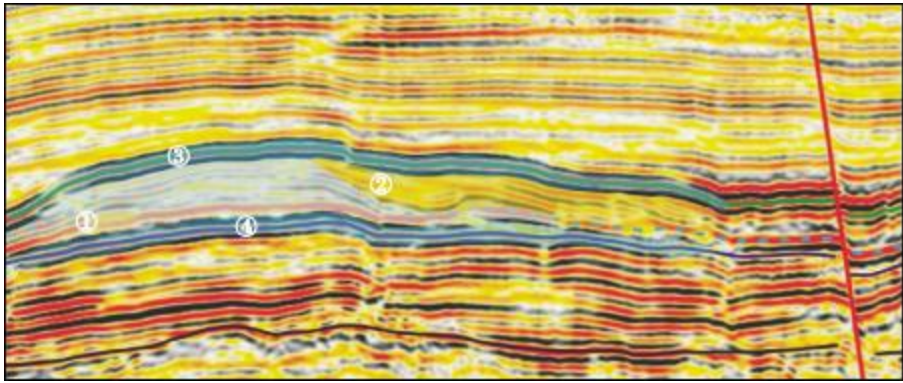


图 4 W 礁的地震响应特征

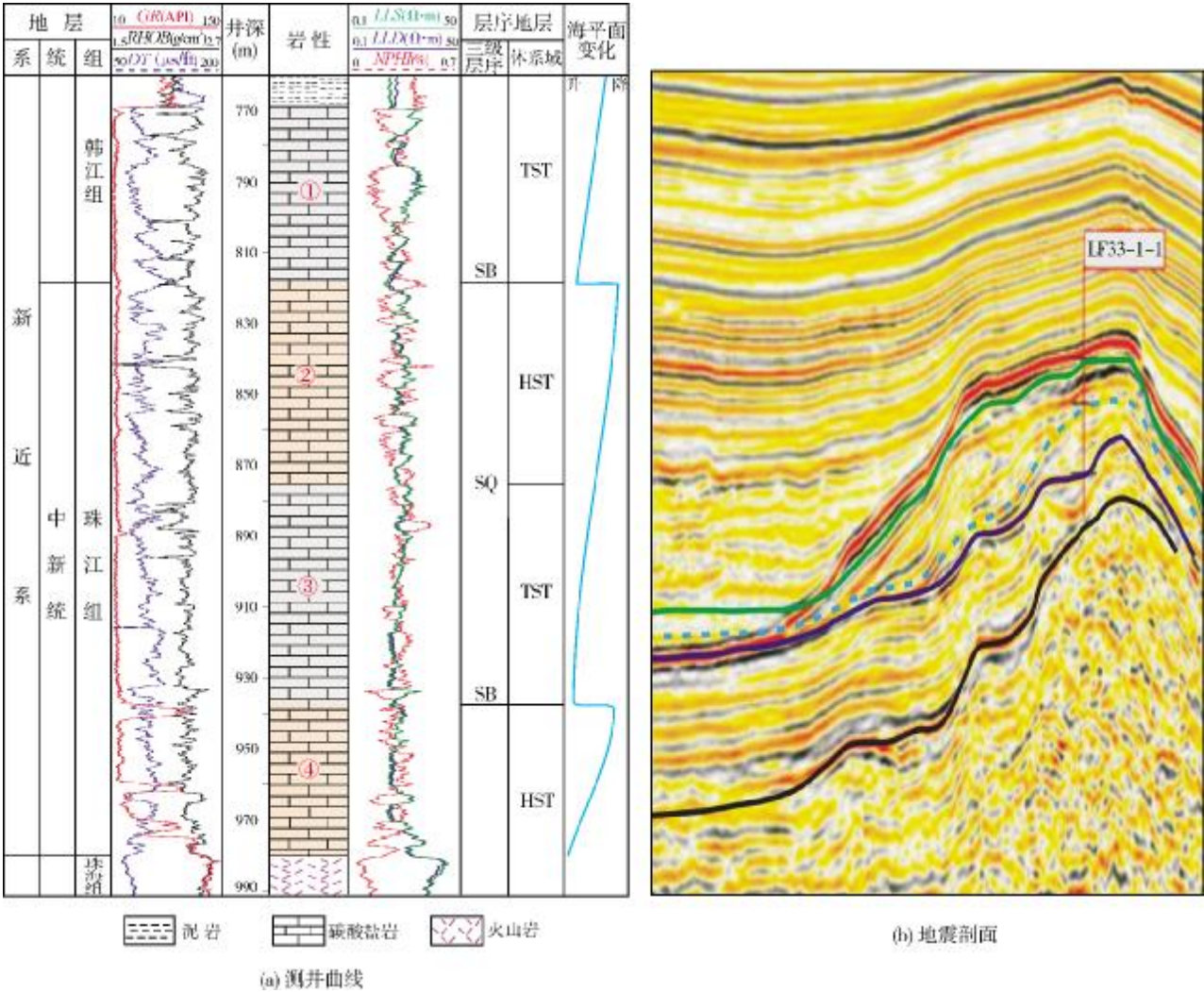


图 5 LF33-1 礁的地震、测井响应特征

逐渐减弱,为海侵时期的响应特征。②、④井段双侧向曲线则表现为中、高幅指形或齿形,曲线形态变化剧烈而频繁,曲线值整体偏低,表明该时期沉积的碳

酸盐岩孔隙改造作用很强,流体响应杂乱而强烈,为高水位期的响应特征。以此划分,将层位标定到地震剖面上,恰与层位对比结果吻合,同时亦可发现

LF33-1 礁内部存在较明显的 S 型复合反射体,其顶底界面同层位对比结果和测井响应深度亦十分吻合(图 5b)。

由此可知,通过深入认识礁体内部的反射特征,结合上述有关规律,可以较可靠地划分出相应的层序界面和体系域界面。

## 4 结 语

通过上述讨论可得出以下几点认识。

(1)在其它因素相对稳定的情况下,生物礁的生长方式明显受到相对海平面变化的影响,进而引起礁体内部形态的复杂变化。海侵期受海平面上升速率的影响可分别发育侧向生长和垂向加积生长,高位期则主要发育侧向增生递降生长。

(2)通过对典型礁的精细地震相分析,结合生物礁的生长规律,可建立典型礁较为可靠的生长模式,

并获得以体系域为单元的层序地层认识。

(3)通过对叠瓦状反射、S 形复合反射及礁体顶底强反射进行识别,可为生物礁的层序划分和层位对比解释提供较可靠的参考性意见。

### 参 考 文 献

- [1] 郭建宇, 马朋善, 胡平忠. 地震—地质方法识别生物礁[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(6): 587-591.
- [2] 邱燕, 陈泓君, 欧阳付成. 南海新生代盆地第三纪生物礁层序地层分析[J]. 南海地质研究, 1999, (11): 53-66.
- [3] 胡平忠. 油气勘探中的生物礁地震—地质解释[J]. 南海东部石油, 1998, 36(1): 1-15.
- [4] 刘殊, 杨继友. 一个可能的生物礁预测[J]. 石油物探, 2004, 43(1): 20-25.
- [5] 冯增昭. 碳酸盐岩岩相古地理学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 90-91.
- [6] 邱燕. 生物礁的地震鉴别方法[J]. 海洋地质, 1999, (2): 12-21.

编辑: 金顺爱

## The Geological Interpretation of Seismic Reflection Characteristics within Reefs and the Understanding of Sequence Stratigraphy with System Tract as a Unit: A Case of Organic Reef Reservoirs in Pearl River Mouth Basin

Huang Cheng, Fu Heng, Fang Xiaolu, Tao Bi'e, Liu Yanting

**Abstract:** The Tertiary reefs in the Pearl River Mouth Basin have huge oil potential. Though the identification of reef's seismic feature and the analysis of sequence stratigraphy have achieved in progress, the analysis with system tract as a unit on sequence stratigraphy of reef reservoirs is seldom done. By analyzing the growth patterns of reefs in response to the sea-level changes, we have summed up several possible geometric patterns and the corresponding seismic feature for the growth of reefs in Dongsha Uplift in the Pearl River Mouth Basin at different times. In accordance with the foregoing understanding of the reefs, the geological interpretation on seismic reflection characteristics is finished and a model of reef formation is built to be aware of stratigraphic sequence of reefs with system tract as a unit. It can provide a more reliable reference to horizon contrast and the division of sequence boundaries.

**Key words:** Reef reservoir; Seismic reflection; Model of reef formation; System tract; Sequence division

Huang Cheng: male, Master student. Add: Chengdu University of Technology, 2 Dongsan Rd., Erxianqiao, Chengdu, Sichuan, 610059 China