

台内薄层礁滩型碳酸盐岩储层定量描述及控制因素 ——以珠江口盆地A地区为例

张向涛¹,汪旭东¹,张素芳¹,余清华¹,艾建峰¹,雷超²

[1 中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院,广东广州510240; 2 中国地质大学
构造与油气资源教育部重点实验室,湖北武汉430074]

摘要:礁滩型碳酸盐岩储层是南海周缘含油气盆地重要的油气聚集的储层之一。珠江口盆地A地区受地震资料品质低和有效储层刻画手段弱的限制,准确表征该区礁、滩相储层的分布特征研究一直较为薄弱。本次研究基于拓频处理后的高分辨率三维地震资料,采用稀疏脉冲反演、物性反演和三维可视化组合等技术,有效预测并刻画了该区礁滩型储层的空间分布,并结合钻井资料揭示了油水界面关系,对礁、滩体油藏的储量进行了准确计算。目前基于本次研究获得的有效储层定量描述结果部署的评价井获得了工业油流,并且储层预测结果与钻井吻合较好,证实了本次研究采用的技术方法对薄层礁滩型储层预测的实用性和有效性。同时,论文还分析了沉积相带、四级海平面下降引起的淡水淋滤溶蚀作用与礁滩型储层发育具有密切的相关,而风向是影响生物礁相储层平面非均质性的另一主要控制因素。

关键词:礁、滩体;薄储层;储层预测;珠江口盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Quantitative description of intra-platform thin carbonate reservoirs of reef-bank facies and their controlling factors: a case from the A Region of Pearl River Mouth Basin

Zhang Xiangtao¹, Wang Xudong¹, Zhang Sufang¹, She Qinghua¹, Ai Jianfeng¹, Lei Chao²

(1. Shengzhen Branch of China National Offshore Oil Corporation, Guangzhou, Guangdong 510240, China; 2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Reef-bank carbonate reservoirs is one of the important reservoir types in the petroliferous basins around South China Sea. Proved hydrocarbon reservoirs in A region of the Pearl River Mouth Basin are of reef-bank carbonate type. For a long time, the restriction of the low-resolution of seismic data and poor description of the effective reservoirs have seriously influenced the understanding of the distribution of the reef-bank reservoirs. The integration of various techniques such as frequency-expanding processing, sparse-spike inversion, physical property inversion and the 3D visualization made us successfully reveal the spatial distribution of the reef-bank reservoirs, delineate oil-water contact in combination with drilling data, and calculate the recoverable reserves of the reef-bank reservoirs. The appraisal wells emplaced based on the quantitative description results of the effective reservoirs flowed commercial oil and the drilling results coincide well with the reservoir description, confirming the practicability and effectiveness of the methods. Meanwhile, sedimentary facies belt and fresh water leaching dissolution caused by drops of 4th-order sea level are also closed related with the development of reef-bank reservoirs. In addition, the direction of wind is another major controlling factor on the heterogeneity of reef-bank reservoirs.

Key words: reef-bank, thin reservoir, reservoir prediction, Pearl River Mouth Basin

珠江口盆地中新统发育大规模的碳酸盐岩沉积,面积约为50 000 km²,生物礁是其中主要的构成部分,主要分布于东沙隆起^[1]。早在20世纪80年代就发现迄今为止南海北部海域最大的生物礁油田,石油地质储量达2×10⁸ t,随后相继发现多个生物礁、滩复合体油藏(包括本文研究的A地区)。

A-1井是A地区礁、滩体油藏的发现井,完钻井深2 175 m,钻遇了下珠江统15.2 m厚的碳酸盐岩油层及8.5 m厚的砂岩油层。地震及钻井取心揭示,下珠江统是在滨岸砂岩的基底上发育了以苔藓虫泥粒灰岩为主要岩石类型的台地相沉积,并在其上依次发育了生物碎屑滩和生物礁的沉积,根据礁、滩所处的位

置,其属于典型的台地内礁、滩体。由于受地震资料分辨率低和储层厚度较薄的限制,对礁、滩相储层的分布规律认识不清,储量计算的结果可信度低,导致该生物礁、滩体油藏在被发现后的近30年内一直仅被视为含油构造而未投入开发生产。

礁滩型碳酸盐岩储层的精细描述是该类油藏勘探中的关键技术,针对研究区的实际情况,储层精细描述的难点主要体现在两个方面:①受地貌、成岩等地质因素的影响,礁、滩沉积复杂,储层横向非均质性强,且研究区内仅有一口钻井,控制点少,加大了沉积相类型与展布研究的难度;②储层厚度薄,研究区地震子波频率约为37 Hz,碳酸盐岩速度取4 080 m/s,计算出的调谐厚度为27 m,而A-1井钻遇的储层厚度为8~14 m,小于调谐厚度,具有薄储层的特点,因而在常规地震剖面上难以识别,薄储层厚度预测已成为制约该油藏下一步勘探的核心问题。

本文基于拓频处理后的高分辨率三维地震资料,采用保幅宽频高分辨率处理、稀疏脉冲反演、物性反演和三维可视化组合技术,从碳酸盐岩储层预测和储量计算两个方面对礁滩型储层开展精细描述,目前获得了工业油流与基于本次研究获得的有效储层定量描述和储层预测结果吻合较好,证实了本次研究采用的技术方法对薄层礁滩型储层预测的实用性和有效性。同时,还对控制该台内礁滩型碳酸盐岩储层分布的影响因素进行分析,以期揭示储层的成因,对指导该区乃至类似复杂储集体的油气勘探均具有重要意义。

1 储层特征

层序地层学及沉积学研究表明,研究区下珠江统碳酸盐岩形成于 SQ_1 (绝对年龄为23.8~21.5 Ma)的高水位体系域(HST)时期^[2](图1),碳酸盐岩沉积总厚度为37.5 m。胡平忠等根据岩心观察(主要是岩性组合及层理结构)及分析化验资料(主要是岩石成分、结构及古生物),将碳酸盐岩的沉积相由下而上依次划分为碳酸盐台地相—生物滩相—生物礁相,根据礁体内部生物演变及岩石结构特征的变化,将生物礁相划分出两个礁的亚相旋回,其中下部为雏礁,上部为发育良好的礁^①。

生物礁相主要岩石类型为藻粘结灰岩、藻粘结有孔虫屑灰岩,生物滩相以微晶骨屑藻屑灰岩、微晶—亮晶骨屑藻屑灰岩、微晶含砂骨屑藻屑灰岩为主。储层类型以孔隙型为主,受裂缝影响较小。储集空间以溶孔为主(图2),包括粒间溶孔、藻架溶孔、有孔虫房室

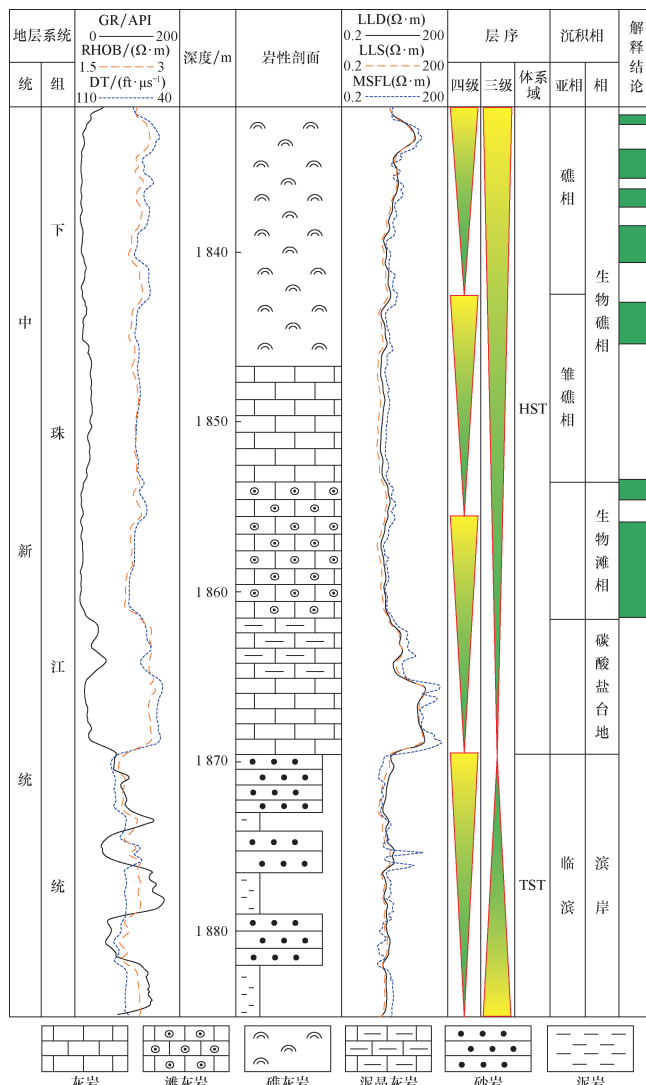


图1 A-1井高分辨率层序划分与沉积相

Fig. 1 High-resolution sequence stratigraphy and sedimentary facies of Well A-1

和珊瑚藻等生物粒内溶孔、基质溶孔等,其中粒间溶孔是最主要的储集空间。

A-1井物性分析数据表明,生物礁相储层孔隙度最大值为23.2%,最小值为7.4%,平均值为16%,其中孔隙度大于20%的样品占21%;渗透率最大值为 $27 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最小值为 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要分布于 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (47%)。生物滩相储层孔隙度最大值为28.9%,最小值为16.4%,平均值为23.2%,其中孔隙度大于20%的样品占66.6%;渗透率最大值为 $203 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最小值为 $1.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要分布于 $10 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (44%)。综合储层石类型、物性、孔隙结构、压汞曲线特征等参数,并与珠江口盆地(东部)其他碳酸盐岩储层对比,研究区礁相储层属于Ⅱ类储层,滩相储层为Ⅰ类储层^②。

①胡平忠,谢衍兴,陆肖容,等.珠江口盆地A-1井沉积学特征及与油气聚集的关系.中海油深圳分公司,1986.

②汪瑞良,刘丽华,傅恒,等.珠江口盆地(东部)碳酸盐岩层序地层及有利储层分布.中海油深圳分公司,2010.

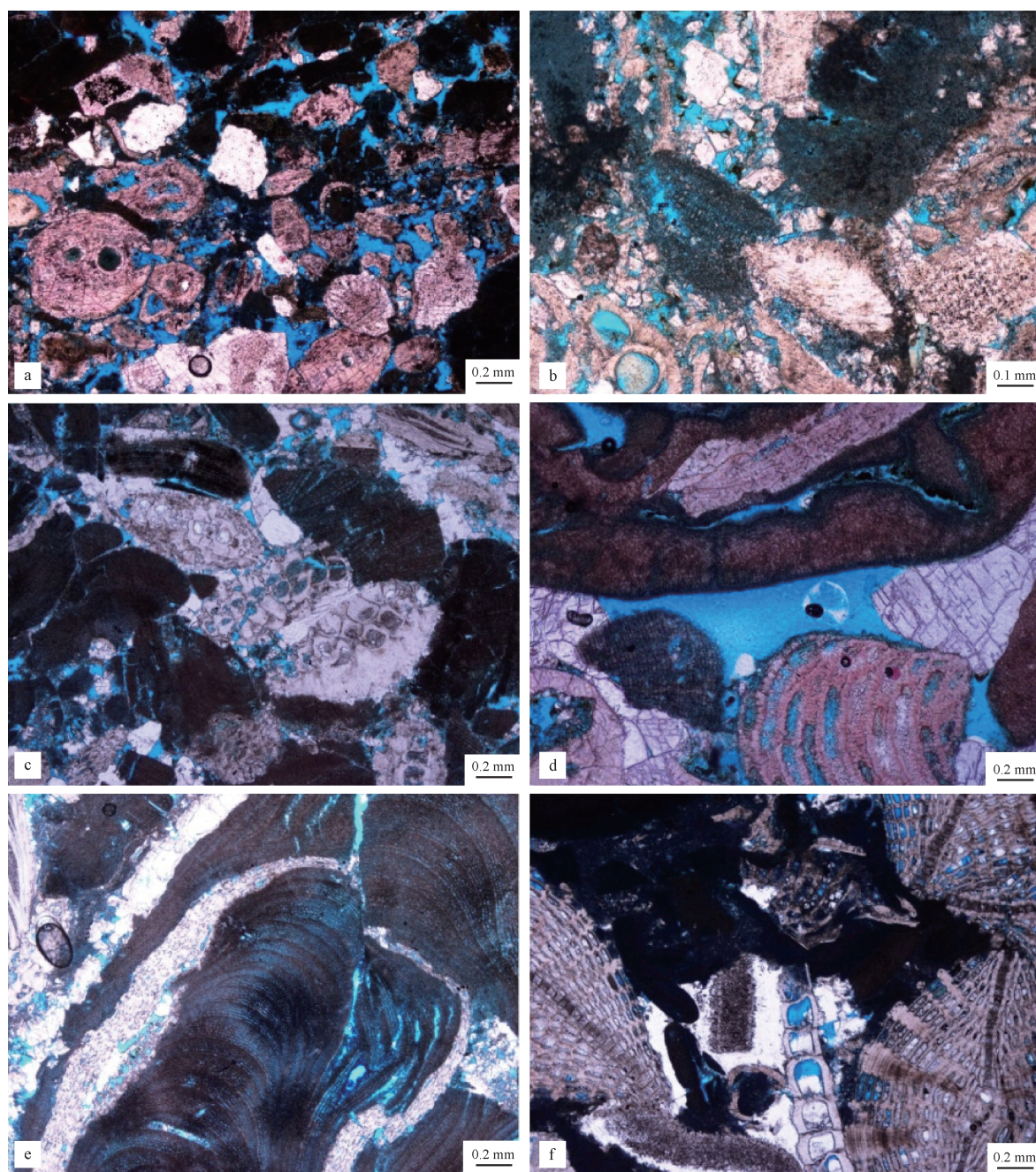


图2 A-1井礁、滩型储层孔隙类型

Fig. 2 Pore types of reef-bank reservoirs in Well A-1

- a. 微晶含砂有孔虫藻屑灰岩,粒间溶蚀孔发育,井深1 860.60 m;b. 微晶-亮晶骨屑藻屑灰岩,粒间及粒内溶蚀孔发育,井深1 857.75 m;c. 微晶藻
钻有孔虫屑灰岩,粒间溶蚀孔发育,井深1 844.05 m;d. 藻粘结灰岩,粗晶方解石胶结孔隙,后被溶蚀,井深1 836.15 m;e. 微晶-微亮晶
藻屑有孔虫屑灰岩。珊瑚藻架孔,井深1 844.05 m;f. 藻粘结灰岩,有孔虫体腔孔,井深1 839.05 m

2 礁滩型储层精细描述

2.1 礁滩型储层预测

四川盆地和塔里木盆地碳酸盐岩油气勘探促进了生物礁滩油气勘探的研究,各种储层预测方法层出不穷,如层序地层和沉积相指导生物礁滩建模^[3-4]、地震沉积学^[5]、地震属性^[6-8]、时频分析^[9-10]、弹性参

数^[11]、波阻抗反演及三维可视化技术^[12]等。这些方法在不同地区均有成功应用的实例,但不同方法所能达到的精度不甚相同,适用性也随不同勘探阶段研究对象的差异而不尽相同。针对研究区礁滩型储层厚度薄的特点,常规地球物理方法不能清楚地展现礁滩储层分布和接触关系,笔者通过地震资料提高分辨率处理和综合解释,并采用稀疏脉冲反演、物性反演和三维可视化组合技术,开展了礁滩型储层的预测。

2.1.1 保幅宽频高分辨率处理

对于厚度薄且物性纵横向变化大的碳酸盐岩储层,常规时间偏移数据体难以满足构造精细解释、储层预测和相应的储量计算的精度,为此需要进一步拓展地震资料频率、提高分辨率、充分挖掘资料潜力,才能对薄储层做出精细预测。为保证拓频处理后地震数据保持原有数据的信噪比、相对振幅关系和时频特性,采用了叠后保幅宽频高分辨率处理技术(HIRAB)。该技术是在提高地震资料信噪比和振幅相对保持的基础上,提取地震资料中的有效低频和高频信号,对地震记录逐个频率点进行振幅谱展宽、拉平,并保留低频信号,使地震资料的振幅谱在有效频带范围内接近反射系数的振幅谱,从而提高分辨率^[13-15]。

HIRAB 处理中一个重要的环节是拓频处理参数试验^[13]。通过 CRP 道集和叠后偏移剖面的频率扫描以及高分辨率处理实验,选择 90 Hz 作为 HIRAB 道集频带的有效高频,为提高信噪比,在对该 CRP 道集进行宽频处理之前,还进行了保幅去噪(CRA)。宽频处理后的 HIRAB 剖面及其对应的振幅谱如图 3 所示,通过与常规偏移剖面对比,HIRAB 剖面展示了更为丰富的地质信息,具体效果主要体现在以下 3 个方面。

1) 主频提高,频带拓宽常规偏移剖面频带为 10 ~ 64 Hz,频带宽度为 54 Hz,主频是 37 Hz,而 HIRAB 剖面频带为 8 ~ 90 Hz,频带宽度为 82 Hz,主频是 49 Hz,相比于常规偏移剖面的高频拓展 26 Hz,频带展宽 28 Hz,主频提高了 12 Hz,反映的地震信息更加丰富。

2) HIRAB 剖面总体分辨率提高,波组关系清楚,分辨薄储层的能力增强,识别分辨能力能达到 10 m。

3) HIRAB 剖面与合成记录吻合更好,同相轴的连续性变好、地质含义更加明确。如 A-1 井钻揭的滩

灰岩在 HIRAB 剖面上显示更清晰,反应灰岩下附砂岩的同相轴连续性也变好。

结合 A-1 井合成记录,在 HIRAB 剖面上可连续追踪出礁灰岩顶面、滩灰岩顶面、灰岩底面及下附砂岩顶面共 4 个控制层面,由于同相轴横向连续性较好,解释结果精细可靠,为后续波阻抗反演过程中初始地震地质模型的合理建立提供了精细的层位数据。

2.1.2 波阻抗反演

礁滩型储层与致密围岩速度差异明显,利用波阻抗反演能很好地识别出低速异常带,从而进行礁滩型储层预测。波阻抗反演作为联系地震、测井及地质信息的纽带,是储层地震预测的核心技术,现已发展了多种反演算法^[16-18],基于工区井少的特点,选用测井约束稀疏脉冲反演技术定量预测礁滩型储集层的空间分布特征。该技术是以测井资料丰富的高频信息和完整的低频成份补充地震有限带宽的不足,用已知地质信息和钻井、测井资料作为约束条件,直接反演岩石的波阻抗,具有地震记录和反演结果可靠性高的优点^[12]。

过 A-1 井波阻抗反演剖面显示(图 4),礁滩储层具有低波阻抗($7\,500 \sim 10\,000 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的特点,而致密灰岩波阻抗最高达 $14\,600 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,可有效分辨储集层段和非储集层段,且与井吻合较好;此外,反演波阻抗剖面不同层系之间阻抗关系纵横延伸情况清晰,礁、滩体储层的展布及非均质性得到良好的展现,为物性反演打下了良好的基础。同时,在反演波阻抗剖面中可清晰地看出礁相储层与滩相储层相互连通,二者为同一油藏。

2.1.3 礁、滩体有效储层雕刻

波阻抗体反应的是岩性信息,而在储层预测研究

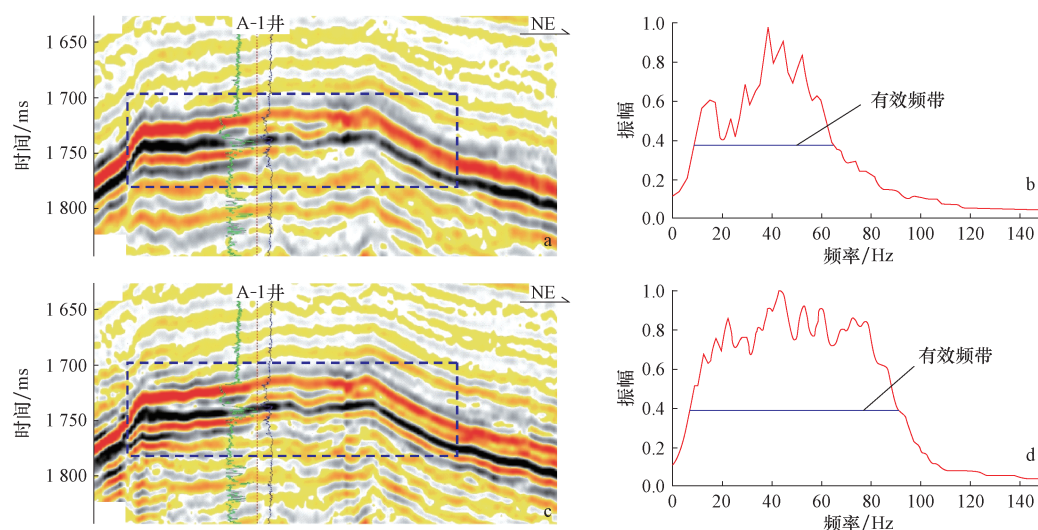


图3 常规偏移剖面(a)和 HIRAB 剖面(c)及其对应的频谱(b,d)

Fig. 3 Conventional migrated section(a) and HIRAB section(c) and their corresponding spectrum(b,d)

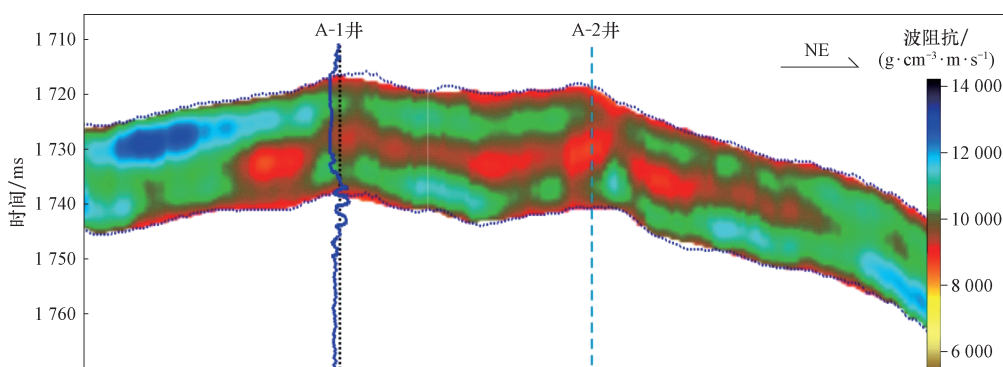


图4 过A-1井波阻抗剖面

Fig. 4 Wave impedance profile tied to Well A-1

中,储层物性及空间展布无疑是人们更关注的内容。在反演波阻抗剖面上,较厚的储层比较容易识别,而较薄的储层则相对难于识别,但其所反映的储层空间变化(横向变化)是可靠的,因而可以利用波阻抗数据对储层物性及其空间展布进行定量描述^[19]。

通过拟合A-1井有效孔隙度与测井波阻抗之间的关系,建立了二者之间的数学关系式:

$$P = -4.65628e - 08X + 0.644284 \quad (1)$$

式中: P 为孔隙度,%; X 为波阻抗, $g \cdot cm^{-3} \cdot m \cdot s^{-1}$ 。

利用式(1)对碳酸盐岩层段的波阻抗数据体进行转换,得到孔隙度数据体。由A-1井灰岩储层段的波阻抗与井点处反演孔隙度数据的分析,分别确定了礁相有效储层和滩相有效储层的孔隙度阈值分别为16%和20%。利用三维数据体识别和追踪储层段,并用解释结果作为约束条件进行储层的雕刻,可在三维空间内清晰地展示礁滩体储层的规模、方位以及其他各种空间展布特征。从礁滩有效储层三维雕刻图中可以看出(图5),二者均分布在构造相对高部位,具有较强的平面非均质性;礁、滩相有效储层的平面分布并不重合,相比较而言,礁相有效储层趋向于东西向展布,而滩相有效储层趋向南北向展布,礁相有效储层的分布范围大于滩相。

2.2 礁滩体油藏储量计算

前已述及,限制研究区礁、滩体油藏有效开发的一个主要原因是储量不落实。从反演的波阻抗剖面可以看出(图4),灰岩段的层内和平面非均质性强,若将其视为层状介质进行储量计算,其结果显然是不可信的。本研究克服了以往仅有二维或常规三维地震资料的限制,在提高地震资料分辨率处理和测井约束稀疏脉冲反演技术基础上,利用物性反演和三维可视化组合技术刻画了礁、滩相有效储层的空间展布特征,再根据A-1井钻探的油水界面结果,计算了含油边界以内的含烃面积和油层有效厚度,在此基础上进行了储量计算。主要工作流程如下:

1) 从礁、滩相有效储层的三维雕刻图中,得到有效储层在时间域的顶、底时间。再在A-1井揭示的油水界面范围内,从有效储层时间域的厚度图上统计了含油面积和时间域的含油体积(图6)。

2) 依据礁相储层和滩相储层的地层速度(分别为4 175 m/s和3 810 m/s),将时间域的含油体积转换到深度域含油体积,并由此得到科学合理的储量评价结果,最终评价礁相储层达到海上油气田评价开发的经济门槛。

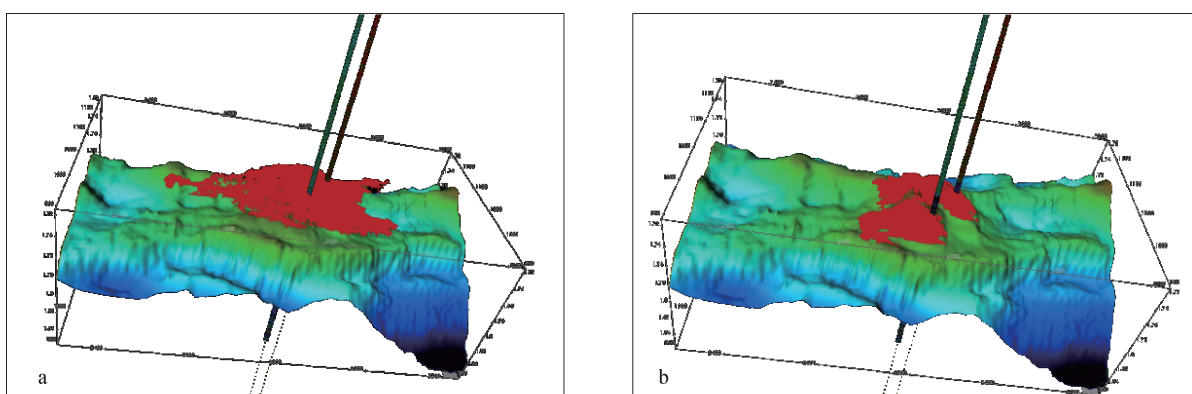


图5 礁(a)、滩(b)相有效储层雕刻

Fig. 5 Map showing description of the effective reservoirs of reef-bank facies

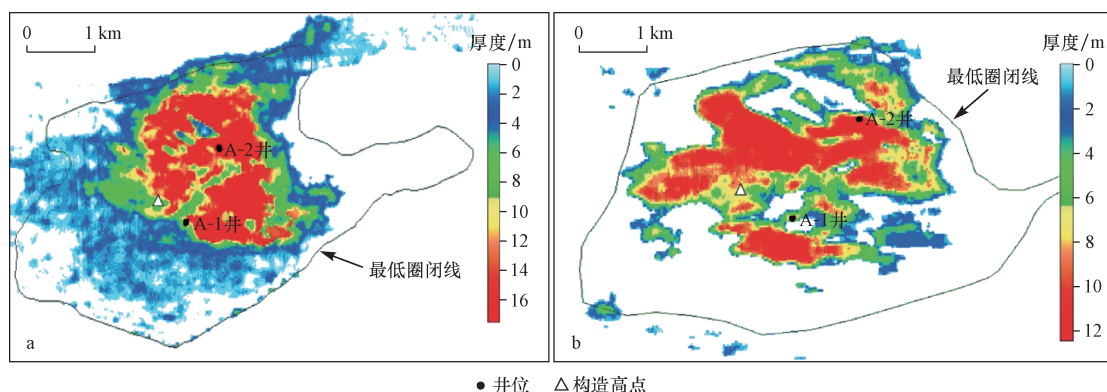


图6 礁(a)、滩(b)体有效储层厚度平面分布

Fig. 6 Isopach map of effective reservoirs of the reef-bank facies

2.3 应用效果分析

从礁、滩体油层厚度平面分布图(图6)可以看出,礁相和滩有效储层最为发育的区域位于构造的东北部,而非构造高部位。基于这一认识,并综合考虑要落实灰岩下伏砂岩储层油水界面的需求,部署了A-2评价井(图6),获得了 $127.3 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产油流。实际钻探揭示A-2井有效储层厚度为27.5 m,其中礁相有效储层20.5 m,滩相有效储层7.0 m,与预测结果基本吻合,证实了本次研究对该礁、滩体油藏的新认识,同时也说明了文中介绍的方法对台内薄层礁、滩体复杂油藏精细描述的可行性。

3 礁、滩体有效储层控制因素

综合礁、滩体有效储层的空间分布(图6)及两口井的实钻结果,认为研究区碳酸盐岩发育主要受三级海平面升降控制,有效储层的形成主要受四级海退半旋回控制。四级海平面升降一方面控制了碳酸盐岩礁、滩的形成发育,另一方面海退造成礁、滩体暴露使其受到淡水的淋滤作用而使孔渗性变好。此外,礁、滩体储集层最为发育的区域位于构造的东北部(A-2井区),而非构造高部位主要与风向有关。

3.1 高能相沉积是有效储层形成的基础

储层特征分析表明,沉积相对储层控制作用明显。研究区储层主要分布生物礁相及生物碎屑滩相带中,主要是源于这两个相带有利于亮晶胶结的颗粒灰岩及生物骨架的形成^[20]。台内生物碎屑滩和生物礁发育于相对高地貌区,位于浪基面附近,强的水动力能将灰泥基质带走,剩下的物质为生屑等颗粒或生物骨架,颗粒及骨架间主要被亮晶所胶结,岩石结构相对疏松,礁、滩体暴露海平面后,淡水容易向其内部很大的深度段内渗透而发生溶蚀作用,形成有效储层。

相比较而言,碳酸盐台地区沉积环境安静,以沉积泥晶灰岩为主,泥晶颗粒非常细小,相互黏结紧密,岩石结构相当致密,流体很难向其内部渗透,溶蚀作用很难进行。

生物滩相储层物性之所以好于生物礁相,原因主要是生物礁相储层的岩石类型主要为藻粘结灰岩,藻粘结结构十分发育,颗粒排列紧密,原生粒间孔的大小和连通性均受到较大的影响,后期溶蚀作用的进行尽管可以形成较多的溶蚀孔,但对于孔隙连通性的改善效果甚微。相比之下,组成生物滩相的微晶-微亮晶藻屑骨屑灰岩,经过海浪的反复拍打淘洗,泥晶基质全部被带走,剩下的颗粒结构成熟度较高,颗粒间的堆积排列方式与砂岩相似,原生粒间孔隙的大小和连通性均较好,尽管这些孔隙后期会被亮晶所胶结,但经过淡水淋滤溶蚀作用后仍能形成连通性较好的溶蚀粒间孔隙(图2a)。

3.2 四级海平面下降是形成高孔段的关键

研究区礁、滩体有效储层的储集空间主要是粒间溶孔,溶蚀作用对有效储层的形成至关重要。由于台缘环境的遮挡,台内环境的浪基面影响深度一般为2~5 m,发育于局部高地的礁、滩体暴露几率大,大气淡水可影响单旋回礁、滩体的中上部^[21-22]。随着海平面周期性下降,碳酸盐台地开始周期性暴露并周期性形成淡水成岩环境,这一过程随着海平面次一级(四级)升降在高位体系域反复进行,是形成多个高孔段的主要原因。根据镜下观察到的渗流粘土、褐铁矿染及淡水白云石的期次胶结等暴露标志(图7),可推测研究区至少经历3期暴露,对应3个四级层序。最早的一期是生物滩沉积后,第二期是礁亚相发育的末期,第三期是第二旋回礁发育之后,每期暴露都伴随着淡水淋滤作用而产生次生溶孔。A-1井四级层序的位置与油层段对应关系较好,充分证明研究区四级海平面下降是形成高孔段的关键。

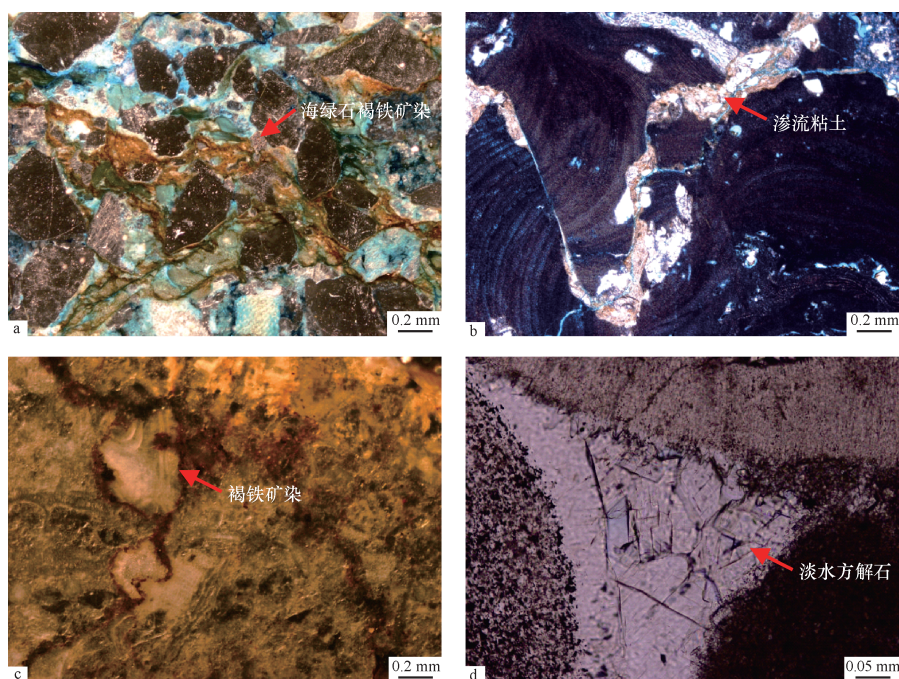


图7 A-1井礁、滩型储层暴露标志

Fig. 7 Exposure marks of reef-bank reservoirs in Well A-1

- a. 微晶含砂屑灰岩,海绿石褐铁矿染,井深1 832.08 m(反光薄片); b. 藻粘结灰岩,渗流粘土,井深1 832.65 m(铸体薄片);
c. 藻粘结灰岩,褐铁矿染,井深1 846.2 m(反光薄片); d. 微晶藻屑屑灰岩,淡水方解石,井深1 857.10 m(偏光薄片)

3.3 风向与生物礁相储层物性横向变化密切相关

礁体生长与水动力有密切关系,而水动力与风向有关,故礁体生长速度和规模与风向有关;碳酸盐岩生物碎屑滩为高能环境下的碳酸盐岩颗粒沉积,其颗粒大小受水动力强弱控制,沉积分布与也与潮流和风向有关^[23]。

对比 A-1 和 A-2 井所处的礁、滩体有效储层的厚度图(图6),不难发现二者滩相有效储层的厚度基本相同,但礁相有效储层的厚度差异较大(已被钻井所证实)。造成礁体有效储层平面非均质性的原因主要与礁体沉积时的水动力亦即风向有关。研究区礁体沉积演化过程中,海槽一直位于东北方向,从海槽向台地为潮流的主流方向。强的水动力能将灰泥基质和死去的藻类带走,剩下的物质以颗粒和生物骨架为主。一般情况下生物体腔和亮晶胶结物最易被溶蚀,其次是生物骨架,最难溶蚀的是泥质。从铸体薄片也可以看出,藻粘结结构发育及灰泥基质含量较高的样品,面孔率低且连通性差(图2)。再结合 A-1 和 A-2 井所处的位置,不难发现 A-2 井更靠近潮流主流方向,其礁体在沉积过程中,颗粒的类型及排列方式更易于后期溶蚀作用的发生,因而孔渗性优于 A-1 井。

4 结论

针对台内礁滩型碳酸盐岩储层厚度薄的特点,以

拓频处理后的高分辨率三维地震资料为基础,采用稀疏脉冲反演、物性反演和三维可视化等技术,详细描述了台内储层的分布特征,以该成果为基础在珠江口盆地 A 地区部署的评价井钻探显示与预测吻合较好。同时,充分考虑了礁、滩体储层的非均质性特点,在反演有效孔隙度体基础上,根据钻井揭示的油水界面关系,计算含油边界以内的含烃面积和油层有效厚度和储量计算,保证了储量计算的科学性和可靠性,为油藏的下一步开发奠定了良好的基础。另外,研究发现本区碳酸盐岩发育主要受三级海平面升降控制,而优质储层的形成主要受四级海退半旋回控制,四级海平面上下降使礁、滩体暴露而遭受淡水淋滤作用是形成高孔隙段的关键,此外,生物礁相有效储层的平面分布与其沉积时的潮流方向(风向)密切相关。

参 考 文 献

- [1] 陈长民,施和生,许仕策,等. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京:科学出版社,2003.
Chen Changmin, Shi Hesheng, Xu Shice, et al. The forming conditions of Tertiary oil-gas reservoir in the eastern Pearl River Mouth basin [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [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] Lavoie D, Chi G, Urbatsch M, et al. Massive dolomitization of apinna-

- cle reef in the Lower Devonian West Point Formation (Gaspé Peninsula, Quebec): an extreme case of hydrothermal dolomitization through fault-focused circulation of magmatic fluids [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(4): 513–531.
- [4] Ma Y Z, Seto A, Gomez E. Depositional facies analysis and modeling of the Judy Creek reef complex of the Upper Devonian Swan Hills, Alberta, Canada [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(9): 1235–1256.
- [5] 黄捍东, 曹学虎, 罗群. 地震沉积学在生物礁滩预测中的应用——以川东褶皱带建南—龙驹坝地区为例 [J]. 石油学报, 2011, 32(4): 629–636.
- Huang Handong, Cao Xuehu, Luo Qun. An application of seismic sedimentology in predicting organic reefs and banks: a case study on the Jiannan-Longjuba region of the eastern Sichuan fold belt [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 629–636.
- [6] 龚立, 梁波, 张红, 等. 多参数聚类技术在川东北生物礁预测中的应用 [J]. 石油学报, 2007, 46(4): 384–389.
- Gong Li, Liang Bo, Zhang Hong, et al. Application of multi-parameter clustering analysis for reef prediction in the northeast Sichuan province [J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2007, 46(4): 384–389.
- [7] 刘殊, 唐建明, 马永生, 等. 川东北地区长兴组—飞仙关组礁滩相储层预测 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 332–338.
- Liu Shu, Tang Jianming, Ma Yongsheng, et al. Prediction of reef and shoal facies reservoirs in Changxing-Feixianuan Formations in northeastern Sichuan basin [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3): 332–338.
- [8] 代双和, 于京波, 袁云超. 利用频谱积分属性评价碳酸盐岩储层 [J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(增刊1): 121–129.
- Dai Shuanghe, Yu Jingbo, Yuan Yunchao, et al. Evaluation of carbonate reservoirs by frequency spectrum integration attributes [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(Supplement 1): 121–127.
- [9] 蔡涵鹏, 贺振华, 黄德济. 礁滩相油气储层预测方法研究 [J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(6): 685–688.
- Cai Hanpeng, He Zhenhua, Huang Deji. Research on the predicting methods of reef and shoal facies reservoirs [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008, 43(6): 685–688.
- [10] Paul M, Harris. Delineating and quantifying depositional facies patterns in carbonate reservoirs: insight from modern analogs [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(1): 61–861.
- [11] 胡伟光, 浦勇, 赵卓男, 等. 利用弹性参数预测礁、滩相储层 [J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(增刊1): 176–183.
- Hu Weiguang, Pu Yong, Zhao Zhuonan, et al. Application of elastic parameters in predicting reef and beach facies reservoir [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(Supplement 1): 176–183.
- [12] 胡向阳, 李阳, 权莲顺, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质建模方法——以塔河油田四区奥陶系油藏为例 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 383–387.
- Hu Xiangyang, Li Yang, Quan Lianshun. Three-dimensional geological modeling of fractured vuggy carbonate reservoirs: a case from the Ordovician reservoirs in Tahe-IV block, Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 383–387.
- [13] 徐明华, 吴先忠, 李瑞, 等. 阿姆河右岸区块盐下地震资料叠前保幅高分辨率处理 [J]. 天然气工业, 2010, 30(5): 26–30.
- Xu Minghua, Wu Xianzhong, Li Rui, et al. Amplitude-preserving high resolution pre-stack processing of pre-salt seismic data in the Amu Darya Right Bank Block, Turkmenistan [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(5): 26–30.
- [14] 袁红军, 吴时国, 王箭波, 等. 拓频处理技术在大牛地气田勘探开发中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(1): 69–77.
- Yuan Hongjun, Wu Shiguo, Wang Jianbo, et al. Application of frequency-broadening processing technique in exploration and development of Daniudi gas-field [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008, 43(1): 69–77.
- [15] 孙夕平, 张研, 张永清, 等. 地震拓频技术在薄层油藏开发动态分析中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(5): 695–701.
- Sun Xiping, Zhang Yan, Zhang Yongqing, et al. Application of seismic frequency expanding technique in dynamic analysis of thin reservoir development [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(5): 695–701.
- [16] 吴大奎, 唐必锐, 覃发兰, 等. 地震资料储层预测反演方法应用研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24(10): 38–42.
- Wu Dakui, Tang Birui, Qin Falan, et al. Research on the inversion methods of seismic reservoir prediction [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(10): 38–42.
- [17] 张宏, 郑浚茂, 杨道庆, 等. 塔中卡塔克区块古岩溶储层地震预测技术 [J]. 石油学报, 2008, 29(1): 69–74.
- Zhang Hong, Zheng Junmao, Yang Daoqing, et al. Prediction of paleokarst reservoir in the southeastern slope of Tazhong area in Tarim Basin using seismic techniques [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 69–74.
- [18] 苏明军, 王西文, 刘彩燕, 等. 储层精细预测技术在周青庄油田的应用 [J]. 石油学报, 2007, 28(6): 92–96.
- Su Mingjun, Wang Xiwen, Liu Caiyan, et al. Application of high-precision reservoirs prediction techniques in Zhouqingzhuang Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 92–96.
- [19] 陆基孟. 地震勘探原理 [M]. 东营: 石油大学出版社, 1993: 106–230.
- Lu Jimeng. The principle of seismic exploration [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 1993: 106–230.
- [20] 郭彤楼. 元坝气田长兴组储层特征与形成主控因素研究 [J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2381–2391.
- Guo Tonglou. Reservoir characteristics and its controlling factors of the Changxing Formation reservoir in the Yuanba gas field, Sichuan basin, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2381–2391.
- [21] 李凌, 谭秀成, 丁熊, 等. 四川盆地雷口坡组台内滩与台缘滩沉积特征差异及对储层的控制 [J]. 石油学报, 2011, 32(1): 70–76.
- Li Ling, Tan Xiucheng, Ding Xiong, et al. Difference in depositional characteristics between intra-platform and marginal-platform shoals in Leikoupo Formation, Sichuan Basin and its impact on reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 70–76.
- [22] 丁熊, 陈景山, 谭秀成, 等. 川中—川南过渡带雷口坡组台内滩组合特征 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(4): 444–451.
- Ding Xiong, Chen Jingshan, Tan Xiucheng, et al. Structural characteristics of intra-platform shoal in the Leikoupo Formation (T2) in the transitional zone of the central and southern Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(4): 444–451.
- [23] 纪学武, 张延庆, 臧殿光, 等. 四川龙岗西区碳酸盐岩礁、滩体识别技术 [J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(2): 309–315.
- Ji Xuewu, Zhang Yanqing, Zang Dianguang, et al. Carbonate reef-shoal reservoir identification in western Longgang, Sichuan Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(2): 309–315.