

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.06.018

无井区生物礁储层与流体识别技术在南海西部深水区的 应用

李明, 邓勇, 范彩伟, 潘光超, 党亚云

中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524057

摘要:南海西部深水区生物礁油气藏潜力巨大,但对生物礁储层的物性、流体识别,前人较少研究,为了更深入地对该区生物礁油气藏进行评估,本次研究采用古地貌控制下地震反射特征点到面对比,识别逐级抬升的松南低凸起区发育了大范围生物礁;深度偏移速度认为生物礁具有顶底面显高速、内部显低速且分布不均的特征;基于 Berryman(1992)和 Kuster-Toksöz(1974)模型的岩石物理正演模拟和无井反演半定量判断研究区储层为中—低孔隙度生物礁。依据叠前弹性反演,结合 V_p/V_s 属性异常范围和深度构造的匹配关系,预测含油气范围位于生物礁群的南部。

关键词:生物礁;正演;无井反演;速度谱; V_p/V_s

中图分类号:P738 **文献标识码:**A

Reef reservoir and fluid identification technology and its application to no-well deep water area in Western South China Sea

LI Ming, DENG Yong, FAN Caiwei, PAN Guangchao, DANG Yayun

Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhan Jiang 524057, China

Abstract: Deep-water bioreef reservoirs in the western South China Sea have great oil and gas potential. However, the physical properties of and the fluid in the reef reservoirs remain difficult to be identified though great endeavors have been made by predecessors. In this study, the correlation of seismic reflection characteristics from a point to an area is carried out based on paleo-geomorphological background. Large reefs were found in the stepped Songnan low uplift. As the depth migration velocity is considered, bioreefs should be bounded by high velocity boundaries with an inner part of uneven low velocity. Based on the results of petrophysical forward modeling and semi-quantitative judgment by well-free inversion from Berryman (1992) and Kuster-Toksöz (1974) model, it is found that the reservoirs are dominated by medium-low porosity reefs. Prestack elastic inversion, combined with the pursuit of matching relationship between V_p/V_s attribute anomalies and deep structures, it is predicted that the hydrocarbon-bearing area should be located in the southern part of the reef group. Combining paleo-geomorphology together with seismic velocity, forward and inversion processing, a set of technology system suitable for bioreef reservoir and fluid identification in a well free deepwater areas in the western South China Sea was developed, with which some reef lithologic traps have been found in the Songnan low bulge area of Qiongdongnan Basin.

Key words: reef; forward; no-well inversion; velocity spectrum; V_p/V_s

世界深水盆地有着丰富的油气资源,已探明原油和天然气储量巨大,其油气富集区主要位于大西洋两岸的被动边缘盆地,如墨西哥湾、西非、巴西等金三角地区。近年来在中国南海、澳大利亚、东非等深水地区勘探均有发现。

南海是新生代盆地,决定了该地区生物礁具有重大的油气勘探潜力。目前南海地区已发现多个大

中型礁型油气藏:南海北部珠江口盆地发现的流花11-1生物礁油田,面积 50.2 km^2 ,礁复合体厚 469.3 m ,已探明地质储量上亿吨^[1];南海中南部曾母盆地发现的亚洲最大的L生物礁气田,天然气储量 1.3 万亿方^[2]。南海西部琼东南盆地松南低凸起深水区发育大面积的生物礁,成藏条件优越,形成了总资源量超万亿的生物礁岩性圈闭群。

资助项目:国家油气科技重大专项“琼东南盆地深水区大中型气田形成条件与勘探关键技术”(2016ZX05026-002)

作者简介:李明(1984—),男,工程师,主要从事琼东南盆地油气研究,E-mail:liming11@cnooc.com.cn

收稿日期:2018-08-20;**改回日期:**2018-11-02. 文凤英编辑

琼东南盆地深水区中新统发育多期丘状地质体,一些学者认为这种丘状反射是生物礁沉积的反映^[3,4],通过研究生物礁的生长环境、发育模式、地震相对比、分布演化来对其分布特征和沉积模式进行分析^[5-8],但较少论证该区生物礁的甜点储层如何分布及含油气性如何预测。本文以琼东南盆地松南低凸起研究区为例,对生物礁进行综合评价,旨在无井区提供一种新的技术体系,提高深水区生物礁油气勘探的成功率。

1 区域背景

南海西部琼东南盆地是一个新生代陆缘拉张盆地,具有“南北分带、东西分块”的构造特点^[9],其主要包括北部坳陷带、中央坳陷带和南部隆起带 3 个一级构造单元。深水区(水深大于 300m 至 3000m)主要位于中央坳陷带和南部隆起带,自西向东为乐东凹陷、陵水凹陷、北礁凹陷、松南凹陷、宝岛凹陷、长昌凹陷、陵南低凸起、陵水低凸起、松南低凸起(图 1)。本次研究区主要位于盆地中部松南低凸起组成区,其四面环凹,远离北礁凸起物源区,现今水深超过 1000m。

研究区以 T60 为界划分断陷、拗陷沉积时期。T60 以下地层为断陷期沉积,该时期构造活动强烈,

形成多个古隆起和凸起区,为生物礁的生长和发育创造了优越的地貌条件。T60 以上地层为拗陷期沉积,构造活动较弱,多为浅海环境,为生物礁生长、发育提供了良好条件。拗陷期梅山组(T50—T40)(图 2)古地理、古气候条件优越,生物礁沿着松南低凸起区广泛发育,进入生物礁发育高峰期。黄流组时期(T40—T30)海平面快速上升,进入加速沉降期,总体处于半深海环境,生物礁仅在局部高点发育,进入生物礁发育晚期^[10]。

本文首先从地震响应、古地貌、速度特征探讨生物礁的识别,然后通过岩石物理正演模拟和叠后反演预测有利储层的分布范围,并结合叠前反演与构造匹配判断其含油气性,最终预测本区生物礁有利勘探区带。

2 生物礁有利储层识别

琼东南盆地深水区中新统发育多期丘状地质体,由于缺少钻井证实,此类丘状地震相的沉积类型仍未被界定。一些学者认为这种丘状反射是生物礁沉积的反映,总体储层物性较好;一些学者认为其是多期水道切割形成的灰泥丘,储层物性差。下面探讨下如何在多期丘状地质体中识别生物礁,优选优质储层。

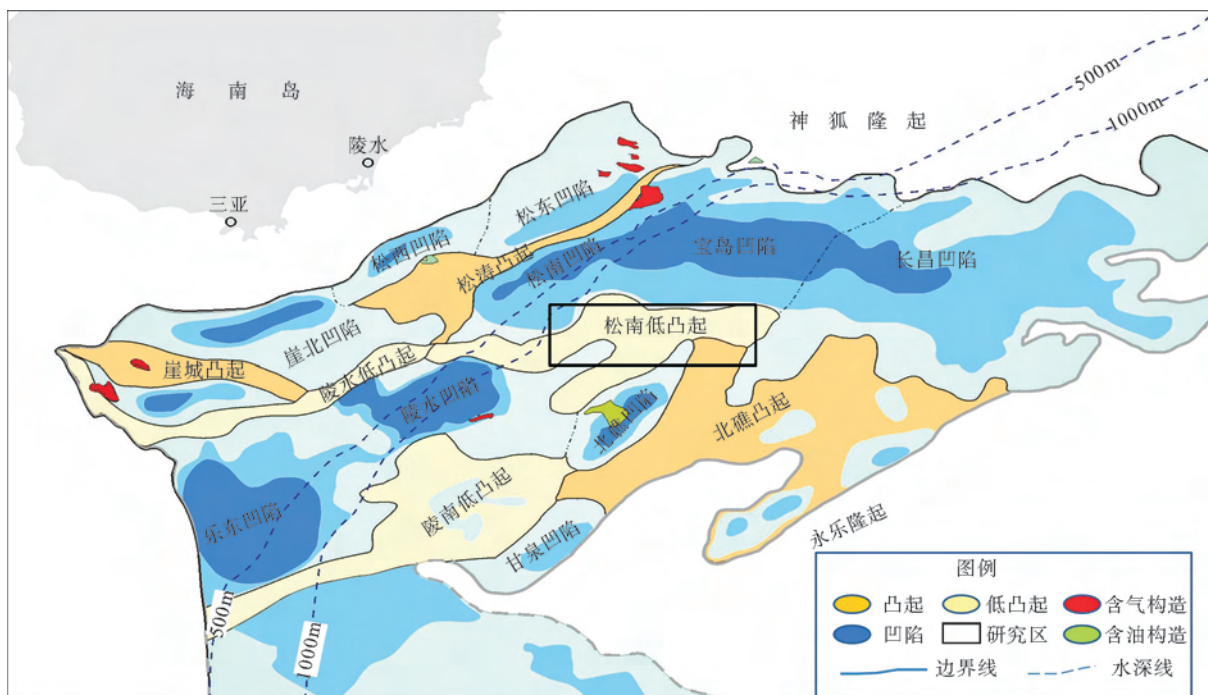


图 1 琼东南盆地构造单元划分

Fig.1 Tectonic units of the Qiongdongnan Basin

地层			界面	年代 /Ma	厚度/m	岩性	沉积环境
系	统	组					
第四系							
新近系	上新统	莺歌海组N ₂	T20	1.8	377~2700		浅海-深海
			T30	5.5	490~2450		浅海-深海
	中新统	黄流组N ₃	T40	11.6	99~550		浅海-深海
		梅山组N ₁ ²	T50	16.0	200~1300		滨海-浅海
		三亚组N ₁ ¹	T60	23.0	0~1100		滨海-浅海
古近系	渐新统	陵水组E ₃ ²	T70	28.4	0~3800		滨海-浅海
		崖城组E ₁ ¹	T80		0~2800		海岸平原海-浅海
	始新统	岭头组E ₂	T100		0~2000		河流-湖泊

图 2 琼东南盆地地层层序划分

Fig.2 The stratigraphic sequence of the Qiongdongnan Basin

2.1 古地貌控制下生物礁识别

一般认为生物礁的地震反射特征主要有:(1)在地震反射外形上,具有明显丘状外形;(2)在与围岩接触关系上,有披覆特征和上超现象;(3)在反射结构上,其顶、底界面多为强反射,内部则常平行连续强反射,或杂乱弱反射。

琼东南盆地松南低凸起上的丘状反射在垂向上叠置(图 3),平面上连片,几乎全区发育,在地震剖面上轮廓清晰,局部表现为明显的上凸外形,整体形态呈丘状、透镜状,以上凸顶点为中心,多呈对称结构,分布于古凸起的两翼,反射具有中连续、层状的特点,具有典型生物礁反射特征。仅以单条测线地震外形判断丘状地质体为生物礁,有点以偏概全。

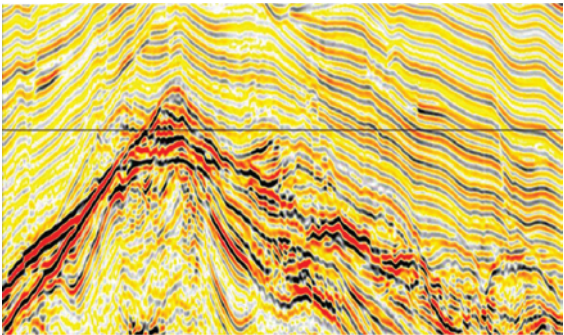


图 3 松南低凸起典型剖面

Fig.3 Typical section of Songnan low uplift

结合古地貌图(图 4),松南低凸起是一个地垒带,可看作由多个相对孤立、逐级抬升的正地貌组合而成,处于浅海的环境在被海水淹没之后,受陆源碎屑影响小,形成了有利于生物礁生长发育的地貌特

征,凸起区丘状反射规模相对较大,而凹陷区的规模相对较小或者没有,其与生物礁的平面发育特征吻合。综合地震外形和古地貌推测丘状地质体较大概率为生物礁。

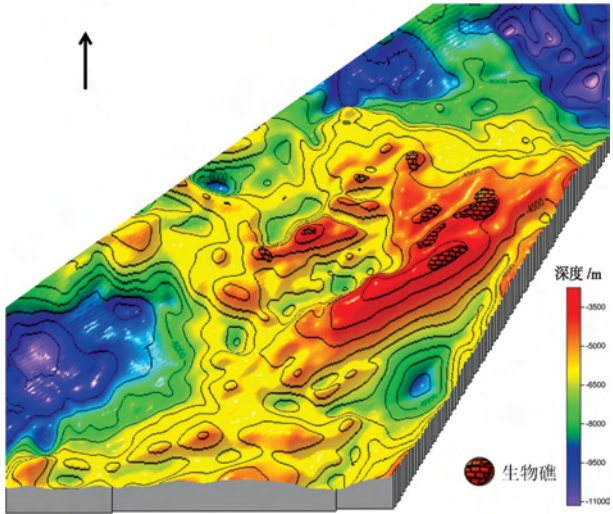


图 4 松南低凸起古地貌图

Fig.4 Paleogeomorphology of Songnan Low Uplift

2.2 生物礁速度分析

通过地震反射外形和古地貌分析,初步认为生物礁大概分布在松南低凸起的各个古隆起区。由于生物礁是碳酸盐岩的一种特殊类型岩石,具有高速的特点^[11-13]。生物礁是由造礁生物及附礁生物形成的地质体,不显沉积层理,且礁体内部孔洞发育,礁体内部地层速度比礁体的顶、底界面的速度低。可以通过速度变化规律进一步判断丘状反射是否为生物礁。

松南低凸起上(图 5)发育典型的丘状反射,基于叠前深度偏移速度剖面(图 6),丘状地质体速度表现为:(1)地质体内部地层速度约 3100m/s,显示为低速,内部速度杂乱;(2)地质体顶底面速度 4000m/s,明显高于内部地层速度,与常规生物礁速度规律匹配,进一步推测该低凸起上丘状地质体为生物礁。

2.3 生物礁岩石物理正演模拟

古地貌控制下生物礁特征识别和基于深度偏移速度体的速度分析仅能定性识别生物礁,如何半定量判断生物礁储层优劣。琼东南盆地深水区无井钻遇生物礁储层,其岩石物理参数较难预测。本次研究采用基于 Berryman(1992)和 Kuster-Toksöz

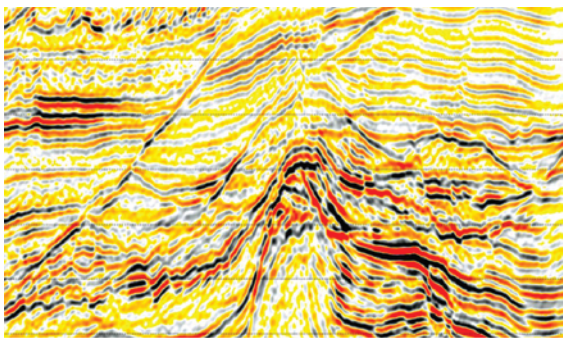


图 5 深水区典型地震剖面图

Fig.5 Typical seismic section in the deep water

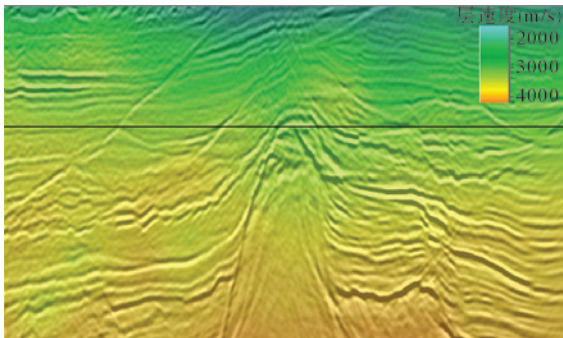


图 6 深水区典型速度剖面

Fig.6 Typical velocity profile in the deep water area

(1974)的岩石物理模型对生物礁的速度、密度进行半定量分析。研究中,输入岩石模型的孔隙度、泥质含量、骨架矿物成分及含量的值,并给定初始孔隙分布,由公式(1),可以得到岩石的弹性模量

$$\begin{cases} \phi_{\text{sand}} = (1 - \phi - V_{\text{clay}}) \frac{\phi}{1 - \phi} = V_{\text{sand}} \frac{\phi}{1 - \phi} \\ \phi_{\text{clay}} = V_{\text{clay}} \frac{\phi}{1 - \phi} \end{cases} \quad (1)$$

其中 ϕ 为总孔隙度, ϕ_{sand} 为较好储层孔隙所占百分比, ϕ_{clay} 为泥岩孔隙所占百分比, V_{sand} 为储层体积所占百分比, V_{clay} 为泥岩体积所占百分比。

$$\begin{cases} (K_{\text{KT}}^* - K_m) \frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_m}{K_{\text{KT}}^* + \frac{4}{3}\mu_m} = \sum_{i=1}^N X_i (K_i - K_m) P^{mi} \\ \mu_{\text{KT}}^* - \mu_m) \frac{\mu_m + \frac{4}{3}\zeta_m}{\mu_{\text{KT}}^* + \frac{4}{3}\zeta_m} = \sum_{i=1}^N X_i (\mu_i - \mu_m) Q^{mi} \end{cases} \quad (2)$$

其中求和是多种类型的包含物(孔隙),且 $\zeta = \frac{\mu}{6} \frac{9K + 8\mu}{K + 2\mu}$, 式中, K_{KT}^* 和 μ_{KT}^* 为岩石的等效体积模量和等效剪切模量; K_m 和 μ_m 分别为岩石基质的体积模量和剪切模量; X_i 是第 i 种包含物(孔隙)的体积含量; K_i 和 μ_i 分别为包含物(孔隙)的体积模量和剪切模量; P^{mi} 和 Q^{mi} 为极化因子,描述了在背景介质 m 中加入包含物(孔隙) i 之后的效果。如果考虑包含物(孔隙)的体积模量和剪切模量为零,那么得到的就是岩石骨架的体积模量和剪切模量^[14-18]。

通过采用 Berryman (1992) 和 Kuster-Toksöz (1974)模型,运用 Gassman 方程拟合出 5%、10%、15%、20%、30%孔隙条件下,含油饱和度 50%、含气饱和度 60%、含气饱和度 70%条件下储层速度(表 1)。如图 7(a)所示为典型的丘状反射特征,首先对丘状反射各地震单元进行细分,然后以 5%~30%五种孔隙条件下、含水、含油饱和度 50%、含气饱和度 60%三种流体参数建立 15 种地质模型进行了物性和流体的假设,其参数见表 1,得到每种孔隙、流体参数条件下的地质模型图 7(b)。对每种地质模型正演模拟分析,通过改变各小层的速度并测试正演结果,发现丘状反射内部的生物礁发育存在非均质性,核部的强反射为储层较发育区,弱反射为储层较致密区。通过正演对比分析发现,地震剖面

表 1 不同孔隙、不同含油气条件下生物礁储层速度

Table 1 Reef reservoir velocity under different hydrocarbon and pore conditions

孔隙度/%	灰岩骨架 速度/(m/s)	水速度/ (m/s)	油速度/ (m/s)	气层速度/ (m/s)	含水储层 速度/(m/s)	含油 50%储 层速度/(m/s)	含气 60%储 层速度/(m/s)	含气 70%储 层速度/(m/s)
5	7050	1500	1180	430	6141	6000	4934	4778
10	7050	1500	1180	430	5439	5234	3796	3614
15	7050	1500	1180	430	4930	4690	3132	3024
20	7050	1500	1180	430	4428	4162	2596	2429
30	7050	1500	1180	430	3734	3454	1973	1830

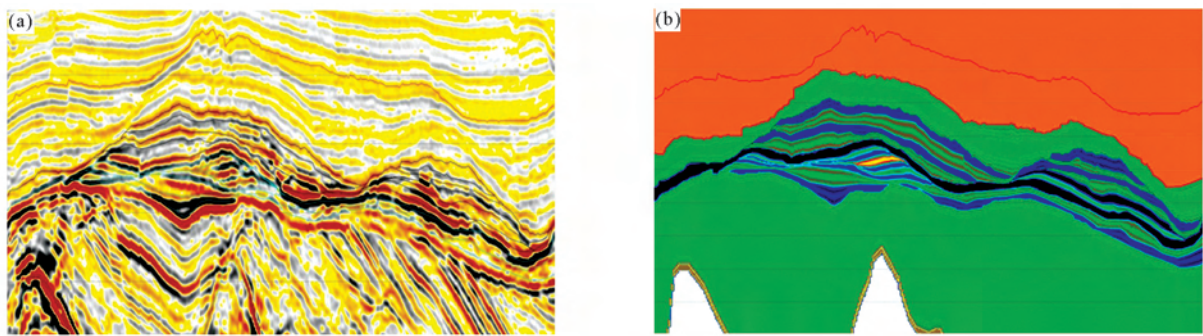


图 7 地震剖面(a)和地质模型(b)
Fig.7 Seismic profile (a) and geological model (b)

图 8(a)生物礁顶面、底面振幅反射较弱区对应储层孔隙度在 15%左右,储层物性中等,内部振幅反射较强区孔隙度在 30%左右,储层物性好。

2.4 无井条件下约束稀疏脉冲波阻抗反演

为了判断生物礁储层物性,本次研究采用基于正演模拟的无井约束稀脉反演能精细评估。基于上述正演模型,模拟储层泥质含量 0%含水模型、泥质含量 25%含水模型、泥质含量 25%含气三类模型,分析其纵波阻抗与孔隙度关系(图 9)。结果表明生物礁储层的纵波阻抗随着孔隙度的增加而减小,随泥质含量增加而增加,因此可通过纵波阻抗高低来判断储层物性好坏。

约束稀疏脉冲波阻抗反演得到的波阻抗剖面见图 10,生物礁构造高部位,储层厚,内部阻抗差异大,其底面存在较低阻抗,内部为中高阻抗且存在一定非均质性,预测其底面储层物性较好,内部储层物性差。侧翼低部位主要为低阻抗值,预测其储层物性较好。波阻抗反演与正演的结果互相匹配,生物礁内部强反射区为优质储层。

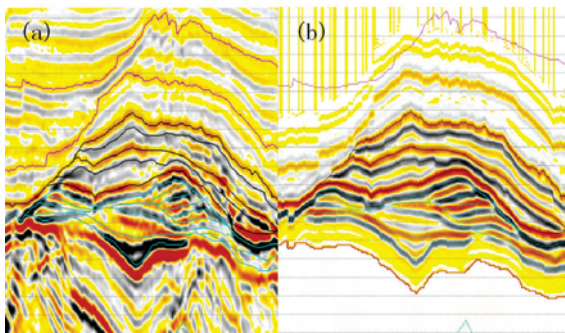


图 8 地震剖面(a)及模型正演结果(b)
Fig.8 Seismic profile(a) and model forward result (b)

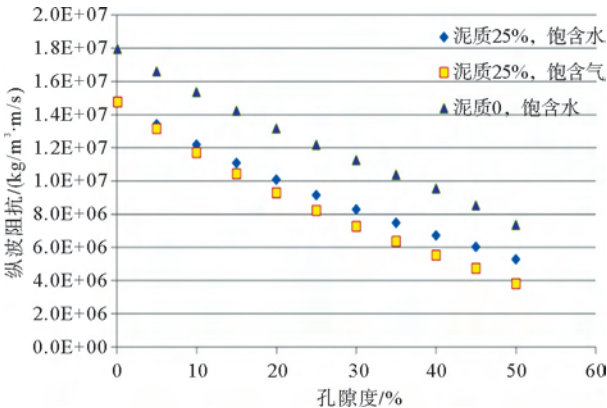


图 9 生物礁储层纵波阻抗值与孔隙度关系
Fig.9 Relationship between impedance and porosity of a reef reservoir

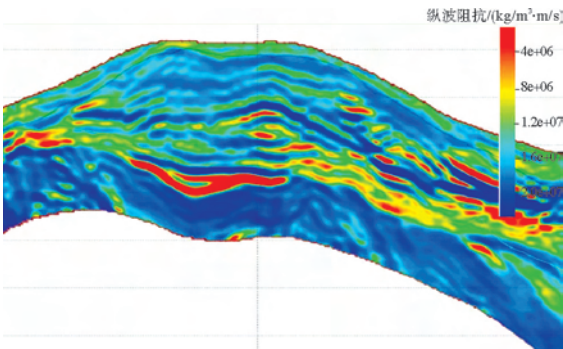


图 10 过丘状反射的典型反演剖面
Fig.10 A typical inversion profile of an overhill reflection

3 叠前反演预测生物礁含油气性

松南低凸起区紧邻松南-宝岛-陵水富生烃凹陷,垂向上发育多条断层和裂隙,运移条件好,但生物礁的含气性较难预测。基于叠前弹性参数反演在地震上保留了部分振幅随着偏移距/入射角变化而变化的规律^[19],其次反演得到 V_p/V_s 、泊松比、

Lame 系数、AVO 截距和梯度、 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 等油气敏感参数,可确定其含油气性。

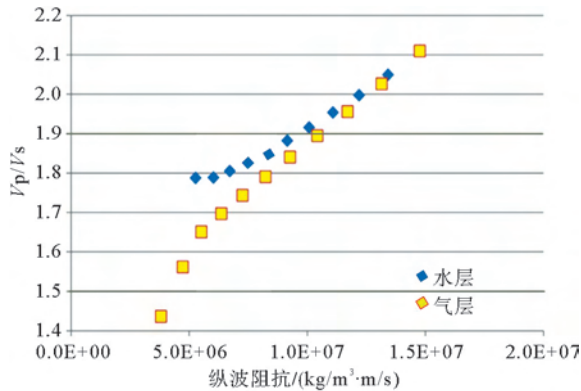


图 11 正演模拟纵波阻抗与 V_p/V_s 关系图

Fig.11 Forward simulation of impedance vs V_p/V_s

由 Berryman(1992)和 Kuster-Toksöz(1974)模型生物礁的岩石物理分析, V_p/V_s 属性(图 11)对生物礁的含气性有较好识别。研究已发现的海上、陆地上生物礁油气藏、气层都具有低 V_p/V_s 特征^[20-21]。基于图 11 研究表明: V_p/V_s 低于 1.8 是该区生物礁含气性判断的依据。叠前弹性参数反演的 V_p/V_s 平面属性(图 12), V_p/V_s 低于 1.8 的烃类富积区集中分布于松南低凸起的南部,该区分成东西两块,东块面积大,结合生物礁目标顶面深度构造立体显示图(图 13),东、西块含气异常区位于该研究区南部的凸起带的目标 1 处,含气异常范围与构造叠合性较好。

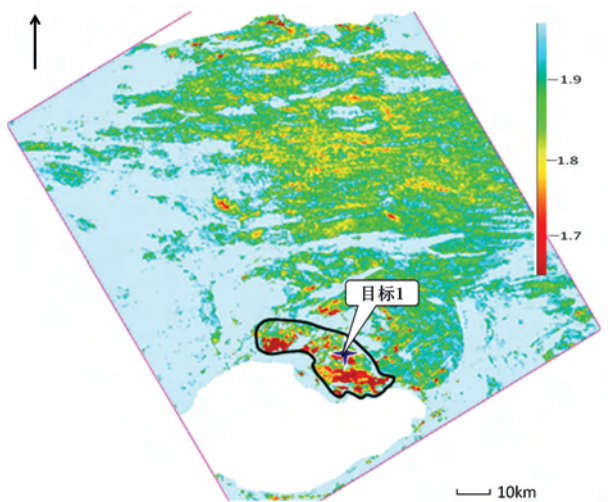


图 12 生物礁目标的 V_p/V_s 平面属性

Fig.12 V_p/V_s plane properties of the reef target

结合生物礁识别、储层分布、烃类分析和构造匹配,确定了目标 1 的位置生物礁储层物性好、含气概

率高,是该区生物礁评价的首选目标。

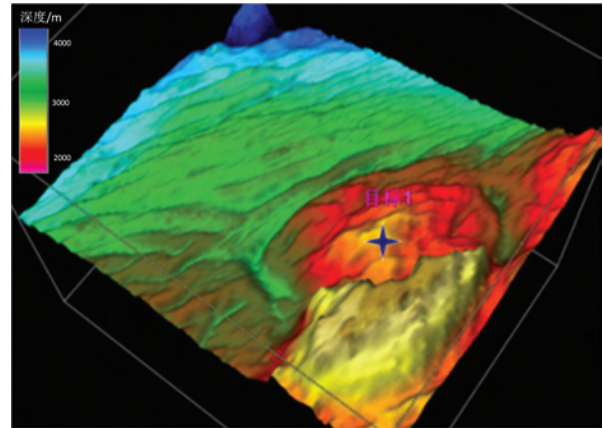


图 13 生物礁目标顶面深度构造立体显示图

Fig.13 Stereoscopic structural diagram of the top surface of the reef target

4 结论

(1)南海西部深水区松南低凸起上生物礁主要发育在相对隆起位置,相对低洼处不发育或者少发育。生物礁顶底面显高速特征,内部速度偏低且杂乱。

(2)生物礁内部地震反射较强位置,显示低阻抗特征,储层物性较好,预测其孔隙度 30%;结合 V_p/V_s 属性与深度构造的匹配,生物礁的含气范围主要位于构造高部位。

(3)针对深水沉积背景情况下,如何判别琼东南盆地梅山组丘状反射地质体,提出无井区生物礁储层识别技术序列:古地貌控制下生物礁地震反射结构对比-地质体内外精细层速度对比-无井区基于 Berryman(1992)和 Kuster-Toksöz(1974)模型的岩石物理模型正演模拟-基于正演模拟的无井约束稀疏脉冲反演。该技术序列不仅能辨别丘状反射地质体是否为生物礁,还能精细预测生物礁优势储层的分布范围。

(4)琼东南深水区处于勘探初期,目标区无井钻遇生物礁,其含油气性较难预测,首次提出无井区生物礁烃类识别技术系列:区域、正演、含气岩石物理统计分析-基于多角度道集的叠前弹性参数反演-深度构造与 V_p/V_s 平面属性叠合分析。该技术序列成果预测深水无井区生物礁的含气范围,在琼东南盆地深水区,识别并评价了多个大型生物礁目标。

参考文献 (References)

- [1] 张广旭,吴时国,朱伟林,等.南海北部陆坡流花碳酸盐台地地球物理响应[J]. 海洋地质与第四纪地质,2011,31(4):106-

- 112.[ZHANG Guangxu, WU Shiguo, ZHU Weilin, et al. Geophysical response of the liuhua carbonate platform in northern South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(4): 106-112.]
- [2] 朱从军, 宋金甫, 等. 西北巴拉望盆地生物礁地震剖面特征与油气检测技术[J]. 海洋石油, 2014, 3: 61-65. [ZHU Congjun, SONG Jinpu, et al. Seismic profile characteristics of reefs and hydrocarbon detection technology in northwest Palawan Basin [J]. Offshore Oil, 2014, 3: 61-65.]
- [3] 姚根顺, 袁圣强, 吴时国, 等. 琼东南盆地深水区双物源沉积模式及勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 685-691. [YAO Genshun, YUAN Shengqiang, WU Shiguo, et al. Double provenance depositional model and exploration prospect in deepwater area of Qiongdongnan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 685-691.]
- [4] 马玉波, 吴时国, 许建龙, 等. 琼东南盆地南部深水凹陷生物礁及碳酸盐岩台地发育模式[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(1): 119-124. [MA Yubo, WU Shiguo, XU Jianlong, et al. Distribution and model of reef and carbonate platforms in the South Deepwater sag of Qiongdongnan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(1): 119-124.]
- [5] 唐武, 王英民, 杨彩虹, 等. 琼东南盆地南部深水区生物礁演化规律及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2013, 5: 965-972. [TANG Wu, WANG Yingmin, YANG Caihong, et al. Evolution and main controlling factors of reef in the Southern Deepwater of Qiongdongnan basin [J]. Natural Gas Geosciences, 2013, 5: 965-972.]
- [6] 伊万顺, 邓艳涛, 狄邦让. 琼东南盆地南部隆起带丘状地震成因讨论[J]. 石油物探, 2012, 2: 199-203. [YI Wanshun, DENG Yantao, DI Bangrang. Discussion on the genesis of domal reflections at the uplift zone of the Southern Qiongdongnan Basin. [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 2: 199-203.]
- [7] 周兴海, 余学兵, 等. 琼东南盆地深水区生物礁生长环境及分布特征分析[J]. 海洋石油, 2013, 4: 1-5. [ZHOU Xinhai, YU Xuebing et al. Study on reef growth environment and distribution characteristic in deepwater area of the Qiongdongnan Basin [J]. Offshore Oil, 2013, 4: 1-5.]
- [8] 田世存, 王英民. 琼东南盆地生物礁的识别和分布演化特征[J]. 特种油气藏, 2012(6): 40-44. [TIAN Shicun, WANG Yingming. Identification and Distribution Evolution Characteristics of Bioherm of South Basin of Qiongdongnan [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012(6): 40-44.]
- [9] 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, 2001, 21(1): 65-73. [QIU Yan, WANG Yingming. Reefs and paleostructure and paleoenvironment in South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(1): 65-73.]
- [10] 张永贵, 宋在超, 周小进, 等. 琼东南盆地南部中新统生物礁的识别[J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 307-309. [ZHANG Yonggui, SONG Zaichao, ZHOU Xiaojing, et al. Identification of reef in Miocene, south of Qiongdongnan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(3): 307-309.]
- [11] 陆基孟, 王永刚. 地震勘探原理[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2009: 256-258. [LU Jimeng, WANG Yonggang. The Principle of Seismic (In Chinese) [M]. Dongying: Petroleum Industry Press, 2009: 256-258.]
- [12] 李振春, 郭朝斌, 张凯, 等. 论碳酸盐岩探区时间域速度分析[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(2): 549-556. [LI Zhenchun, GUO Zhaobin, ZHANG Kai, et al. To obtain accurate seismic velocity field in karst exploration area [J]. Progress in Geophysics (In Chinese), 2011, 26(2): 549-550.]
- [13] 翟世奎, 米立军, 等. 西沙石岛生物礁的矿物组成及其环境指示意义[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2015, 40(4): 601-603. [ZHAI Sikui, MI Lijun, et al. Mineral compositions and their environmental implications reef of Shidao Island, Xisha [J]. Earth Science - Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(4): 601-603.]
- [14] 孙卫涛, 刘嘉玮, 巴晶, 等. 孔隙介质弹性波频散—衰减理论模型[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(2): 590-595. [SUN Weitao, LIU Jiawei, BA Jing, et al. Theoretical models of elastic wave dispersion-attenuation in porous medium. [J]. Progress in Geophysics. 2015, 30(2): 590-595.]
- [15] 赵克超, 陈文学, 陶果利. 用 Kuster-Toksöz 方程简化孔隙纵横比谱及判断储层孔隙类型[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 24(1): 37-38. [ZHAO Kechao, CHEN Wenxue, TAO Keli. Simplifying the aspect ratio distribution of reservoir pore and predicting the type of it by Kuster-Toksöz equation [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2008, 24(1): 37-38.]
- [16] Kuster G T, Toksöz M N. Velocity and attenuation of seismic waves in two phase media: Part I: Theoretical formulation [J]. Geophysics, 1974, 39: 587-606.
- [17] Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. Rock physics handbook [M]. Stanford Rock Physics Laboratory, 1996.
- [18] Pickett G R. Acoustic characteristics and their applications in formation evaluation [J]. J Petrol Technol, 1963, 15: 650-667.
- [19] Mitchum R M, Vail J R, Sangree J B. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 6: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences [M] // In: Payton C E, ed. Seismic Stratigraphy: AAPG Geologists Memoir, 1977, 26: 117-134.
- [20] 张艳芳. AVO 叠前反演技术在生物礁储层油气检测中的应用[J]. 天然气工业, 2010, 30(12): 34-36. [ZHANG Yanfang. Application of pre-stack AVO inversion to the hydrocarbon detection in biohermal reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(12): 34-36.]
- [21] 陈勇, 陈洪德, 关达, 等. 地震技术在碳酸盐岩生物礁油气储层流体识别中的应用[J]. 科学技术与工程, 2013, 7: 6213. [CHEN Yong, CHEN Hongde, GUAN Da, et al. The Application of Seismic Technology in Fluid Discrimination of Carbonate Reef Oil and Gas Reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 7: 6213.]