

文章编号:1672-9854(2010)-04-0062-06

## 叠前弹性波阻抗反演在四川 FL 地区 礁滩型储层预测中的应用

胡伟光, 李发贵, 杨鸿飞

(中国石油化工股份有限公司勘探南方分公司研究院)



胡伟光

**摘 要** 叠前弹性波阻抗反演对礁滩型储层的预测和流体识别较叠后声阻抗反演的可信度更高,可对含油气性进行半定量—定量描述。以四川 FL 地区礁滩型储层为重点,以叠前弹性波阻抗反演为技术路线,对该地区反演出的数据体进行交汇解释,预测出了该区礁滩型储层的平面分布特点,预测结果与该区仅有的两口钻井资料相吻合。实践表明,用交会法并结合对储层响应敏感的两个参数泊松比和剪切模量进行储层解释,可靠度较高。

**关键词** 生物礁储层; 叠前弹性波阻抗反演; 地震解释; 储层预测; 四川盆地

**中图分类号**: P631.445 **文献标识码**: A

**胡伟光** 1972 年生。1995 年毕业于中国地质大学(武汉)水文地质及工程地质专业;现从事地震资料处理、解释及储层反演方法研究工作。通讯地址:610041 成都市南二环 4 段 9 号;电话:(028) 85164781

当前,中国南方海相地区的天然气勘探主要以礁滩型储层<sup>[1-9]</sup>为主,近年来在四川“开江—梁平”古海槽两侧上二叠统长兴组展开的礁滩型储层勘探取得了重要进展,许多大中型气田的发现都与长兴期生物礁的发现密切相关,所以对礁滩型储层的预测与勘探具有很重要的意义。但是,对该类储层的预测与流体识别等方法技术尚处探索阶段。

1999 年,Connolly<sup>[10]</sup>在他的论文中首次提出了弹性波阻抗(EI),并利用 Aki 和 Richards 近似式推导出 EI 表达式。基于部分叠加的角道集数据进行的弹性波阻抗反演,较传统的 AVO 分析方法更为稳健,并且可将传统 AVO 信息通过更为直观的手段展示于地质人员或其他非地球物理人员。

弹性波阻抗的提出,使得叠前反演走上了与叠后反演相结合的道路,同时通过弹性波阻抗反演,使各种对岩心、流体敏感的弹性参数可以更便捷地得以提取。

本次研究工作以中国南方四川 FL 地区礁滩型储层为重点,以叠前弹性波阻抗反演<sup>[11-14]</sup>为技术路

线,对在该地区反演出的数据体进行交汇解释,预测礁滩型储层的平面分布。

### 1 储层预测研究思路

地震反射振幅不仅与分界面两侧介质的地震弹性参数有关,而且随入射角变化而变化。叠前弹性波阻抗反演技术利用不同炮检距的地震数据及横波速度、纵波速度、密度等测井资料,联合反演出与岩性和含油气性相关的多种弹性参数,综合判别储层物性及含油气性。正是由于叠前弹性波阻抗反演利用了大量地震及测井信息,所以进行多参数分析的结果较叠后声阻抗反演在可信度方面有很大提高,可对含油气性进行半定量—定量描述。

叠前弹性波阻抗反演基于流体置换模型技术,应用纵波声波时差、密度、泥质含量、孔隙度、含水饱和度以及骨架和流体的各种弹性参量,反演井中横波速度。根据井中纵波速度、横波速度及密度计算井中弹性波阻抗,在复杂构造框架和多种储层沉积模式的约束下,采用地震分形插值技术建立可保留

收稿日期:2010-07-23;改回日期:2010-09-01

复杂构造和地层沉积学特征的弹性波阻抗模型,使反演结果符合研究区的构造、沉积及异常体特征。采用广义线性反演技术反演各个角度的地震子波,得到与入射角有关的地震子波。在每一个角道集上,采用宽带约束反演方法反演弹性波阻抗,得到与入射角有关的弹性波阻抗。最后对不同角度的弹性波阻抗反演纵横波阻抗,进而获得泊松比等弹性参数,对储层的几何、物性及含流体特性进行精细描述。

本次叠前弹性波阻抗反演的流程和思路见图 1,用纵波声波时差、密度、泥质含量、孔隙度、含水饱和度以及骨架和流体的各种弹性参量,反演井中横波速度。在横波速度反演基础上,再反演每口井的不同入射角的弹性波阻抗。

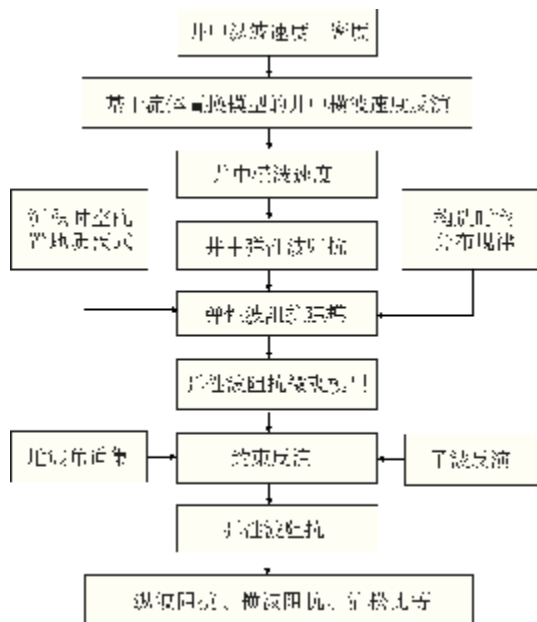


图 1 叠前弹性波阻抗反演流程

然后,利用已有钻井资料进行约束,对叠前弹性波阻抗反演出的数据体进行交会,以储层含油气作为指示依据。交会类别的选取,可以有以下两种标准:(1)以工区范围中钻井的井旁道数据交会点分布作为解释的依据;(2)以交会点的自然分类作为依据。

## 2 预测应用

FL 地区位于四川“开江—梁平”古海槽长兴期台地边缘礁滩相向南延伸的有利区域,近期通过三维地震勘探,落实了长兴组礁滩储层。XL1 井揭示该

储层具有良好的油气显示,而邻近 XL1 井的 Y18 井则微产气,展示了该区良好的油气勘探前景。

根据 XL1 井的地震标定(图 2),该礁滩型储层地震响应特征为较连续的波峰、中强振幅,中部储层地震响应特征表现为杂乱空白反射。通过三维地震资料与邻区对比分析,FL 地区长兴期生物礁滩储层分为礁—滩复合体和礁后浅滩两种类型。礁—滩复合体表现为弱振幅、丘状、杂乱地震反射和两翼同相轴中断、上超等;礁后浅滩则表现为中强变振幅、较连续、亚平行反射结构特征。

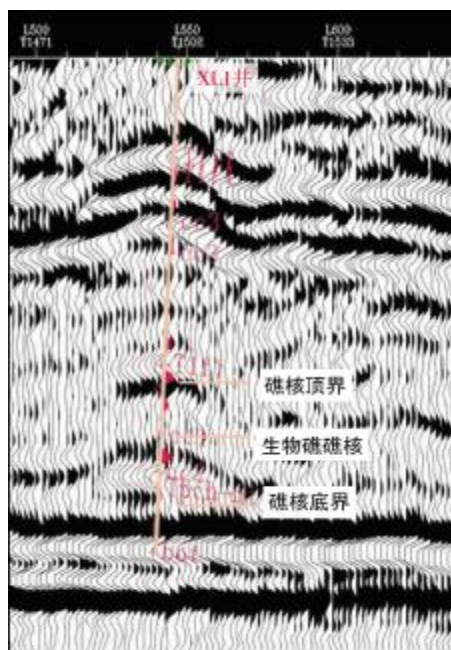


图 2 FL 地区过 XL1 井地震剖面及标定

对礁滩型储层进行预测,首先必须了解礁滩沉积相平面分布情况,再对它及其周围储层进行预测。沉积相的划分主要利用地震相波形分类<sup>[15-18]</sup>,辅以钻井资料进行控制。根据长兴组地震反射的振幅波形而对地震波形进行平面分类,对本区地震反射波形共分为 11 类,并根据已钻井长兴组所处沉积相对应的地震反射特征及钻井资料把地震相转换为沉积相(图 3)。图中白色虚线为岩性界线,可见 FL 地区长兴期生物礁分为两处:一处为弯月型,走向 E—W;另一处则为宽带状,走向为 NW—SE。其中弯月型礁带由红、黄、绿、蓝等多色参杂其中,平面上色带变化也较快,这表明该礁带岩性成分组成较为复杂且平面变化快速;而宽带状礁带则主要由红、黄色组

成,可见该礁带就岩性组成来说,比弯月型礁带岩性组成相对较“纯”,岩性成分在平面上呈相对稳定状态。前缘斜坡则由蓝色或淡青色类波形组成(平面上分布稳定),反映了该区域岩性沉积稳定的特点。台地则由红色及绿色类组成,分布也较稳定,且与宽带状礁带呈平行状。

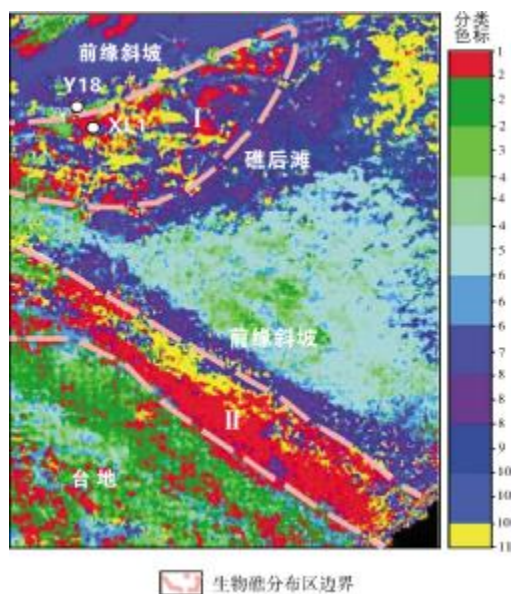


图3 FL地区根据地震相转换所得的沉积相解释平面图

I 弯月型生物礁展布区; II 宽带状生物礁展布区

本次储层预测采用叠前弹性波阻抗反演技术,利用弹性参数来分析储层的流体性质,例如泊松比或剪切模量要比速度对储层流体更加敏感,利用这一特性就可以预测目的层中的含油气性,其中该反演技术的关键节点主要实现过程如下。

## 2.1 横波速度反演

对 XL1 井及 Y18 井进行基于岩石物理流体置换模型的井中横波反演,调整岩石骨架及流体参数,并以模型声波时差 AC 和密度  $\rho$  与原始测井曲线的声波时差 AC 和密度  $\rho$  的相关性为质量控制建立 Xu-White 模型<sup>[19]</sup>。当模型与实际测量值的误差极小时, Xu-White 模型充分满足实际地质情况,保证了基于此模型进行横波速度反演的可靠性(图4)。图中红色曲线为 AC 模型曲线,蓝色曲线为实测 AC 曲线,可见两曲线吻合度较高,这样才能获取准确的子波信息。

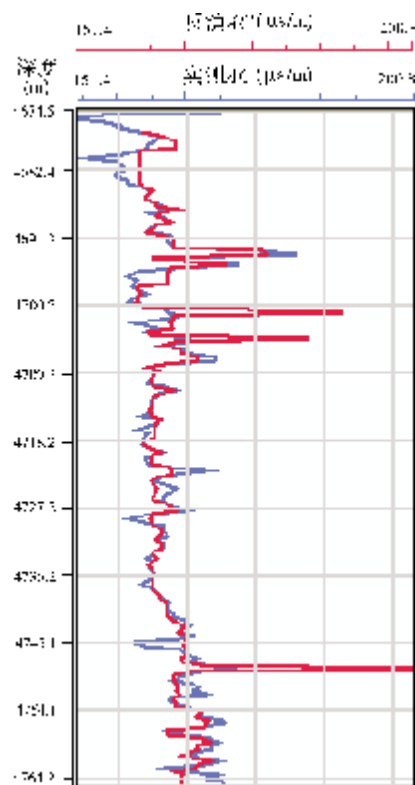


图4 Y18井中反演与实测声波时差(AC)测井曲线叠合图

## 2.2 EI 曲线及其子波提取

为进行各入射角道集( $8^\circ$ 、 $18^\circ$ 、 $26^\circ$ )弹性波阻抗的约束反演,须建立已知井的 EI (弹性波阻抗)曲线。根据常规测井曲线的纵波时差(转换为纵波速度)、密度及反演出来的横波速度,由 Connolly 的 EI 表达式<sup>[10]</sup>计算指定入射角的 EI 曲线。

根据推导得到,入射角为  $\theta$  时的反射系数  $R_{pp}$  可近似为:

$$R_{pp}(\theta) \approx \frac{EI_2 - EI_1}{EI_2 + EI_1} \quad (1)$$

式中:  $EI_1$ ——反射界面上层的弹性波阻抗;

$EI_2$ ——反射界面下层的弹性波阻抗。

弹性波阻抗的基本作用是代替与入射角相关的 P 波反射率,就象 AI 代表零偏移距声波阻抗一样。当  $\theta=0^\circ$  时,纵波反射系数为:

$$R_{pp}(0^\circ) \approx \frac{AI_2 - AI_1}{AI_2 + AI_1} \quad (2)$$

式中:  $AI_1$ ——反射界面上层的零偏移距声波阻抗;



$AI_2$ ——反射界面下层的零偏移距声波阻抗。

此时,弹性阻抗与声波阻抗相等,即

$$EI=AI=\rho V_p \quad (3)$$

式中:  $AI$ ——声波阻抗;

$\rho V_p$ ——纵波阻抗。

由此可见,非垂直入射时纵波反射系数表达式与垂直入射时纵波反射系数表达式得以统一,这样就可以借用传统相对成熟的叠后波阻抗反演方法反演弹性波阻抗,这也是 Connolly 定义弹性波阻抗的原因。非垂直入射的褶积模型如下:

$$S(\theta)=R(\theta) * W(\theta) \quad (4)$$

其中:  $S(\theta)$ ——入射角为  $\theta$  的地震道信号;

$R(\theta)$ ——该入射角下此道的反射系数序列(可根据测井的 P 波速度、S 波速度及密度

计算);

$W(\theta)$ ——该入射角下此道的子波信号。

为获取准确的  $W(\theta)$  信息,必须进行精细的层位标定及子波提取。

子波提取是地震反演的关键问题之一,直接影响反演精度,只有在子波提取较精确的情况下,才能获得高精度度的预测结果。层位标定的好坏直接影响到子波提取的结果,而子波的正确性对层位的准确标定具有重大影响,由于它们之间互相制约,因此只有通过子波提取和层位标定的交互迭代来获取最佳子波。考虑到实际情况中,子波随偏移距的变化,在弹性波阻抗反演中,分别对所有入射角道集进行子波提取。同时,对各入射角的子波提取须保证其连续性(图 5),突变的子波将影响反演结果。

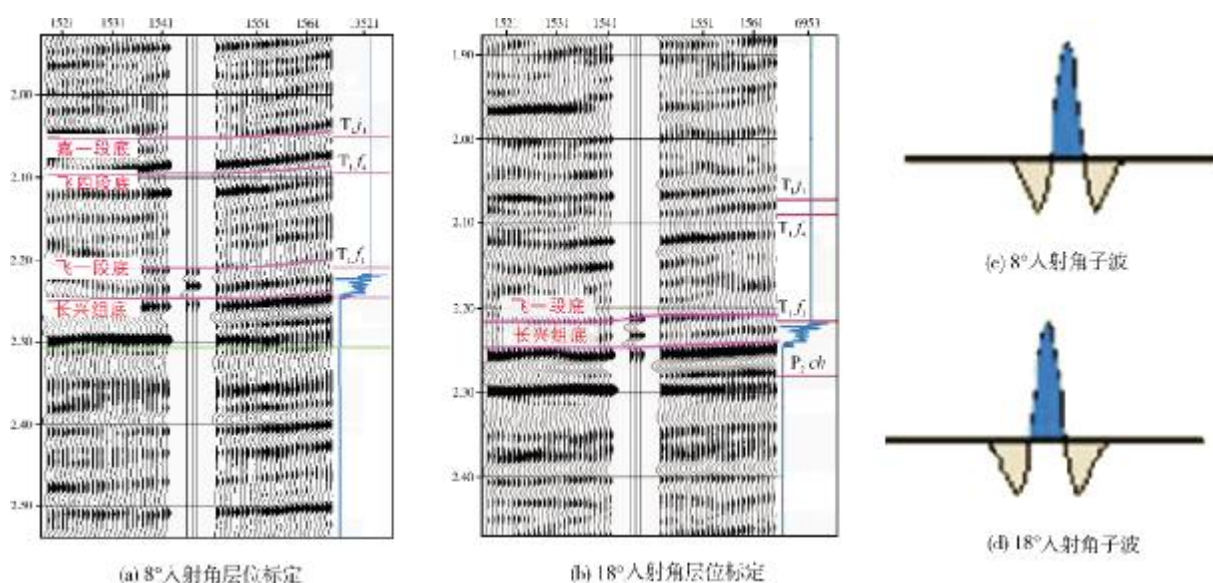


图 5 Y18 井中不同的入射角合成记录标定及子波提取

$T_{1j}$  嘉陵江组;  $T_{1f}$  飞仙关组;  $P_{2ch}$  长兴组

上述横波速度反演和 EI 曲线及其子波提取这两个研究步骤对完成叠前弹性波阻抗反演至关重要,这两个过程完成的好坏,将直接影响到反演的精度,所以必须认真做好,为后续的叠前弹性反演打下基础。

## 2.3 储层预测

根据井中纵波速度、横波速度和密度计算出的井中弹性波阻抗,在复杂构造框架和多种储层沉积模式的约束下,采用地震分形插值技术建立可保留

复杂构造和地层沉积学特征的弹性波阻抗模型,使反演结果符合研究区的构造、沉积和异常体的特征。采用广义线性反演技术反演各个角度的子波,得到与入射角有关的地震子波。在每一个角道集上,采用宽带约束反演方法反演弹性波阻抗,得到与入射角有关的弹性波阻抗。最后对不同角度的弹性波阻抗反演纵、横波阻抗,进而获得泊松比(图 6)等弹性参数,图中可见青色—蓝色区域与该区长兴组生物礁带吻合较好。

叠前弹性波阻抗反演主要取泊松比与剪切模量进行交会解释(图7)。根据川东北海相礁滩储层特征并结合 XL1 井、Y18 井长兴段钻井资料,把研究区的该预测段划分为五个不同的类型,它们被解释为不同的含气及流体存在特征。其中 I 类为富含气储层,II 类为中等含气储层,III 类为弱含气储层,IV 类为差储层或含水储层,V 类则为致密无储层。

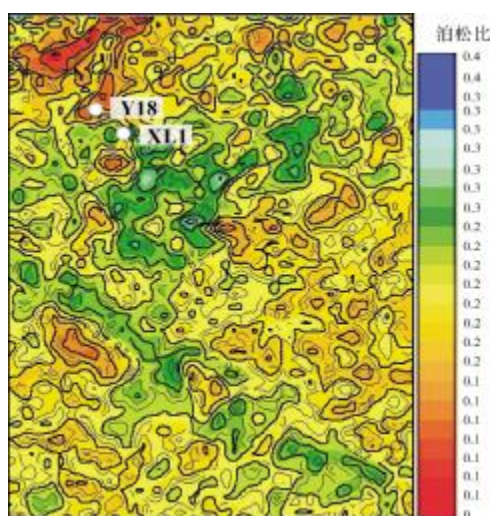


图6 FL地区泊松比平面图

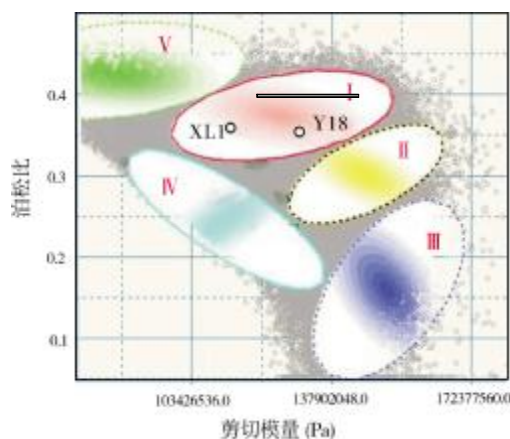


图7 FL地区根据剪切模量和泊松比率进行储层预测分类的解释交会图

I 富含气储层; II 中等含气储层; III 弱含气储层;  
IV 差储层或含水储层; V 致密无储层。

图中各储层类型中所充填的颜色为取样点比较集中的区域

把通过交会解释的储层类型投到平面图上(图8)可看出,含气储层在平面上的分布基本上与生物礁沉积相(图3)相吻合,但也有些差别。如弯月状礁的南

部,其礁后滩储层相对发育,而长条状礁则只有礁盖储层相对发育,且其西北比东南部位储层的含气性好,该长礁带内的含气储层平面上显示分布比较不均匀。

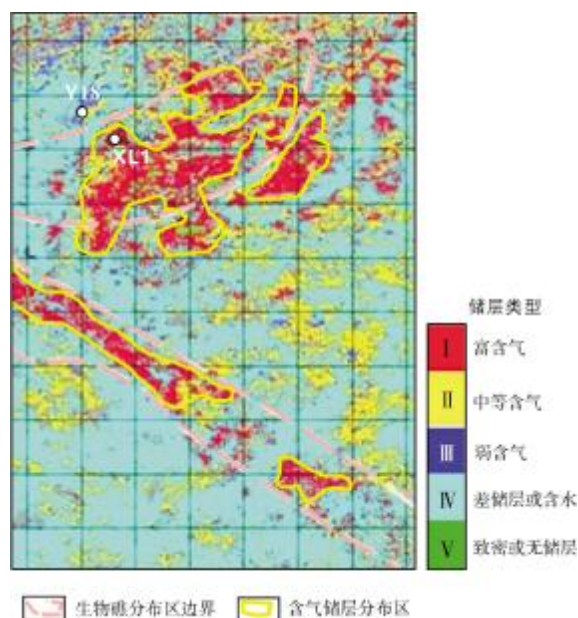


图8 FL地区储层预测分类平面图

### 3 应用效果分析

研究区内现有钻井不多,只有 Y18 井和 XL1 井,XL1 井在长兴组钻遇良好的礁盖储层,而 Y18 井则钻遇差储层,微弱含气。从图8也能看到,Y18 井钻在 II、III 类型储层内(蓝、黄色区域),储层不是很发育,且与周边的储层发育区域不相连。而 XL1 井则钻在 I 类储层内(红色区域),且周边储层相对发育,可见储层预测与钻井资料分析吻合较好。该区礁盖储层与川东北元坝地区<sup>[20]</sup>也相类似,但必须注意的是,并不是所有生物礁上都发育良好的礁盖储层,这还需看储层段具体预测情况。

叠前弹性波阻抗反演克服了常规叠后反演储层信息量不足的缺点,包含了更丰富的岩性和流体信息。但叠前弹性波阻抗反演也不能克服多解性,因此应将叠前弹性波阻抗反演与地质资料充分结合,做出符合研究区地质先验规律的解释结果,才能有效地降低其多解性。

### 4 几点认识

本次对四川盆地 FL 地区礁滩储层进行预测,

利用叠前弹性波阻抗反演方法取得了较好的效果,得到了以下几点主要认识。

(1)叠前弹性波阻抗反演能较好地区分出储层的含气性及平面分布范围,适于流体及岩性检测。

(2)用交会法并结合对储层响应敏感的两个参数泊松比和剪切模量进行储层解释,可靠度较高。

(3)单一参数预测及叠后反演具有较大的多解性,对储层分布精细刻画不利。

(4)礁滩储层的发育具有不均匀性,并不是所有的生物礁礁盖上都发育良好的含气层,有的也可能发育水层或差储层。

(5)区域储层预测分为五类,FL 地区礁滩含气储层的连通性较好,属 I 类储层,是有利的勘探首选目标。

#### 参考文献

- [1] 吴熙纯,刘效曾,杨仲伦,等. 川东上二叠统长兴组生物礁控储层的形成[J]. 石油与天然气地质,1990,11(3):283-296.
- [2] 王生海,强子同. 四川华蓥山涧水沟上二叠统生物礁[J]. 石油与天然气地质,1992,12(2):147-154.
- [3] 范嘉松,吴亚生. 川东二叠纪生物礁再认识[J]. 石油与天然气地质,2002,23(1):12-18.
- [4] 王一刚,张静,杨雨,等. 四川盆地东部上二叠统长兴组生物礁气藏形成机理[J]. 海相油气地质,1997,5(1):145-152.
- [5] 王一刚,文应初,张帆. 川东地区上二叠统长兴组生物礁分布规律[J]. 天然气工业,1998,18(6):10-15.
- [6] 牟传龙,谭钦银,余谦,等. 川东北地区上二叠统长兴组生物礁组成及成礁模式[J]. 沉积与特提斯地质,2004,24(3):65-71.
- [7] 牟传龙,马永生,余谦,等. 四川宣汉盘龙洞生物礁古油气藏油气源分析[J]. 石油实验地质,2005,27(6):570-574.
- [8] 马永生,牟传龙,郭彤楼. 四川盆地东北部长兴组层序地层与储层分布[J]. 地学前缘,2005,12(3):179-185.
- [9] 马永生,牟传龙,郭旭升,等. 川东北地区长兴组沉积特征与沉积格局[J]. 地质论评,2006,52(1):25-29.
- [10] Connolly P A. Elastic impedance[J]. The Leading Edge, 1999,18(4):438-452.
- [11] 王涛,朱祥,谭代英. 毛坝构造飞仙关组裂缝储层综合预测方法[J]. 石油物探,2009,48(4):383-389.
- [12] 曹孟起,王九栓,邵林海. 叠前弹性波阻抗反演技术及应用[J]. 石油地球物理勘探,2006,41(3):323-326.
- [13] 彭真明,李亚林,梁波,等. 叠前弹性阻抗在储层气水识别中的应用[J]. 天然气工业,2007,27(4):43-45,52.
- [14] 刘卫华,高建虎,陈启艳,等. 苏里格气田某工区储层预测可行性研究[J]. 岩性油气藏,2009,21(2):94-98.
- [15] 胡伟光. 地震相波形分类技术在川东北的应用[J]. 勘探地球物理进展,2010,33(1):52-57.
- [16] 于红枫,王英民,李雪,等. Stratimagic 波形地震相分析在层序地层岩性分析中的应用[J]. 煤田地质与勘探,2006,34(1):64-66.
- [17] 邓传伟,李莉华,金银姬,等. 波形分类技术在储层沉积微相预测中的应用[J]. 石油物探,2008,47(3):262-265.
- [18] 殷积峰,李军,谢芬,等. 波形分类技术在川东生物礁气藏预测中的应用[J]. 石油物探,2007,46(1): 53-57.
- [19] Xu S,White R E. A new velocity for clay-sand mixture[J]. Geophysical Prospecting,1995,43(1): 91-118.
- [20] 胡伟光,蒲勇,赵卓男,等. 川东北元坝地区长兴组生物礁的识别[J]. 石油物探,2010,49(1): 46-53.

编辑:吴厚松

## Application of Prediction of Pre-stack Elastic Impedance Inversion in Reef-shoal Reservoir at FL Area, Sichuan Basin

Hu Weiguang, Li Fagui, Yang Hongfei

**Abstract:** Though reef-shoal reservoirs have become increasingly important targets for gas exploration, the methods of the prediction of them and the identification of fluids in them are still in the probing stage. Comparing with post-stack acoustic impedance, the pre-stack elastic impedance can be more reliable in quantitative-semiquantitative petroliferous evaluation because of data-based multi-parameter analysis. This method has been applied in the prediction of reef-shoal reservoir in FL area where intersection interpretation is also used after. The result has shown that the reef-shoal reservoir in FL area is characteristic of plane distribution, which is accorded with the data from only two boreholes. It is indicated that it is more reliable to predicate reef-shoal reservoirs by the intersection interpretation combining with Poisson ratio and shear module.

**Key words:** Reef reservoir; Reservoir interpretation; Pre-stack elastic impedance inversion; Seismic interpretation; Sichuan Basin

**Hu Weiguang:** male, Engineer. Add: SINOPEC Southern Exploration Branch Company, 9 Si Duan, Nan Erhuan Rd., Chengdu, Sichuan, 610041 China