

# 叠前 AVO 反演在储层含油气性预测中的应用

李建华<sup>①</sup> 刘百红<sup>②</sup> 张延庆<sup>①</sup> 冯天明<sup>③</sup> 王霞<sup>①</sup> 杨超<sup>④</sup>

(<sup>①</sup>东方地球物理公司研究院地质研究中心,河北涿州 072751; <sup>②</sup>中国石化石油物探技术研究院,江苏南京 211103;

<sup>③</sup>东方地球物理公司青海物探处,甘肃敦煌 736200; <sup>④</sup>中国石油煤层气有限责任公司,北京 100028)

李建华, 刘百红, 张延庆, 冯天明, 王霞, 杨超. 叠前 AVO 反演在储层含油气性预测中的应用. 石油地球物理勘探, 2016, 51(6): 1180-1186.

**摘要** 与叠后波阻抗反演相比,叠前 AVO 三参数反演能得到更多的参数,例如纵横波阻抗、纵横波速度等,进而为储层预测提供更可靠的支撑。本文阐述了基于纵波反射系数的 Fatti 近似公式进行叠前 AVO 反演的原理,给出了利用叠前 AVO 反演进行储层含油气性预测的基本思路 and 关键技术,包括敏感属性分析、角度子波提取、初始模型建立等。松南盆地实例表明,叠前 AVO 反演比叠后反演能获得更丰富的信息,有利于储层含油气性预测。

**关键词** 叠前反演 储层预测 含油气性 AVO

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2016.06.018

## 1 引言

叠前 AVO 反演的弹性参数远比叠后反演丰富,可区别岩性与含油气性,为钻探提供了更准确的依据。但是,叠前 AVO 反演的应用受地质和地震资料的限制,因此叠前 AVO 反演的实际应用也并不十分普遍,叠前 AVO 反演技术取得的效果并非都理想。一方面是因为叠前 AVO 反演所基于的反射波系数表达式不同,反演策略也不同;更重要的原因是叠前 AVO 反演实际上也存在多解性问题。国内外学者在减少反演的多解性,更好地挖掘叠前 AVO 反演在实际储层预测中的应用潜力等方面进行了积极探索。例如,印兴耀等<sup>[1-3]</sup>对反演方法进行了研究,提出了模型依赖程度低、全局收敛能力强的反演方法;苑书金等<sup>[4]</sup>、吴志强等<sup>[5]</sup>、武丽等<sup>[6]</sup>分别成功地利用叠前 AVO 反演进行了隐蔽岩性气藏的识别。张津海等<sup>[7]</sup>研究了道集品质对叠前 AVO 反演的影响;李国发等<sup>[8]</sup>研究了与炮检距有关的地层吸收对 AVO 分析的影响及其补偿方法,以提高数据质量,减少反演的多解性。

本文首先阐述了基于纵波反射系数的 Fatti 近

似公式进行叠前 AVO 反演的原理,给出了利用叠前 AVO 反演进行储层含油气性预测的基本思路 and 关键技术,包括敏感属性分析、角度子波提取、初始模型建立等。以松南盆地中央拗陷区三维地震工区为例,就叠前 AVO 反演在储层含油气的识别和预测方面的应用进行了研究,给出了应用叠前 AVO 反演进行储层含油气性预测的关键技术环节及其注意事项。根据该研究结果设计的井实钻证明储层预测准确、效果较好。

## 2 叠前 AVO 反演原理及关键技术

### 2.1 叠前 AVO 反演原理

叠前 AVO 反演的基础是 Zoeppritz 方程。Zoeppritz 方程通过一个复杂的非线性关系表示振幅系数和岩性参数的关系。虽然可以直接利用 Zoeppritz 方程进行非线性反演方法求解得到岩性参数,但是实际中非线性反演问题存在诸多困难。因此通常将求解模型参数的非线性问题转化为求解模型参数修正量的线性问题,该线性化过程出现了许多 AVO 反演的纵波反射系数近似表达式,例如 Shuey 公式<sup>[9]</sup>等。本文的 AVO 反演是基于 Fatti 等<sup>[10]</sup>改

\* 河北省涿州市东方地球物理公司研究院地质研究中心,072751。Email:ljh2009@126.com

本文于 2015 年 6 月 10 日收到,最终修改稿于 2016 年 9 月 30 日收到。

进后的 Aki-Richards 公式

$$R_{PP}(\theta) = C_1 R_P + C_2 R_S + C_3 R_D \quad (1)$$

式中:  $R_{PP}$  为纵波反射系数。  $C_1 = 1 + \tan^2 \theta$ ;  $C_2 = -8\gamma^2 \sin^2 \theta$ ;  $C_3 = -\tan^2 \theta + 4\gamma^2 \sin^2 \theta$ ;  $\gamma = \frac{\bar{v}_S}{\bar{v}_P}$ ;  $R_P = \frac{\Delta Z}{2Z_P} \approx \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta v_P}{\bar{v}_P} + \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} \right)$ ;  $R_S = \frac{\Delta Z}{2Z_S} \approx \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta v_S}{\bar{v}_S} + \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} \right)$ ;  $R_D = \frac{\Delta \rho}{2\rho}$ ;  $R_P$ 、 $R_S$ 、 $R_D$  分别为纵、横波阻抗反射系数和密度反射系数;  $\theta$  为纵波入射角;  $v_P$ 、 $v_S$ 、 $\rho$ 、 $Z_P$ 、 $Z_S$  分别为纵波速度、横波速度、密度、纵波阻抗和横波阻抗,上划线“-”表示界面两侧参数的均值,符号“ $\Delta$ ”表示界面两侧参数的差值。

定义  $L_P = \ln(Z_P)$ , 则纵波阻抗反射系数可以表示为

$$R_P \approx \frac{1}{2} (L_P^{i+1} - L_P^i) \quad (2)$$

同理,横波阻抗与密度反射系数可以表示为

$$R_S \approx \frac{1}{2} (L_S^{i+1} - L_S^i) \quad (3)$$

$$R_D \approx \frac{1}{2} (L_D^{i+1} - L_D^i) \quad (4)$$

应用测井资料建立初始纵、横波阻抗和密度模型,用子波与模型反射系数褶积产生合成地震数据,通过构建目标函数,使合成地震数据与实际地震资料之差达到最小。采用共轭梯度法反演纵波阻抗、横波阻抗和密度等重要的岩性参数。

## 2.2 叠前 AVO 反演关键技术

### 2.2.1 共角度道集叠加数据体的产生

叠前反演需要部分角度叠加数据体作为输入数据,需要进行叠前道集数据的叠加角度划分和部分叠加,角度道集的划分分两步进行:

首先,需要确定主要目的层段能够完整接收的最大入射角度和受干扰波影响小的最小入射角度。通过对目的层段角道集数据进行扫描分析确定主要目的层段能够完整接收的最小和最大入射角。

其次,需要确定在最小和最大入射角之间划分成多少个角度叠加数据体。理论上叠加数据体角度划分精细程度直接关系到地震 AVO 特征的保持,但考虑到实际地震叠前道集的信噪比以及子波提取标定等工作量的因素,一般生成 3~5 个角度叠加数据体。例如,最大入射角小于  $40^\circ$  的叠前道集一般可生成三个角度叠加数据体,最大入射角大于  $45^\circ$

的可生成四个或四个以上角度叠加数据体。

共角度叠加数据体从理论上讲相位应该完全一致,可是由于一些不确定因素(如动校正不准等)的影响,导致部分角度叠加数据体的相位在局部会产生小的相位差。为了消除相位差,需要对共角度叠加数据体进行体对齐处理。有两种体对齐处理方法:一种是层控对齐,是在给定层的上下时窗内计算出时移量,通过内插确定层与层之间的时移量;另一种是体对齐,计算数据窗口内的每一个数据点的时移量。因此体对齐更加精确。体对齐不要求任何层位信息,所以结果不受层位数据间隔的影响。

### 2.2.2 共角度地震子波提取

地震子波提取是地震反演的关键步骤之一,它会直接影响反演的精度,只有在子波提取较精确的情况下,才能获得高精度的反演结果。叠前 AVO 反演过程是子波与模型反射系数褶积产生合成地震数据,当合成地震数据与实际地震资料的差最小时,则终止反演迭代。层位标定的精度直接影响到子波提取结果,而子波的正确性对层位的准确标定有影响,它们之间相互制约、相互影响,只有通过子波提取和层位标定的交互迭代才能获取最佳子波。如图 1 所示,不同角度的部分叠加数据体对应提取不同的子波,以消除不同角度的共角度部分叠加地震数据的振幅、频率和相位变化等方面的影响。提取的子波要使合成记录与地震数据之间匹配良好、子波形态简单、在多井间具有一致性;尽量避免“空变子波”,避免子波形态的空间变化对反演属性造成的不确定性影响。

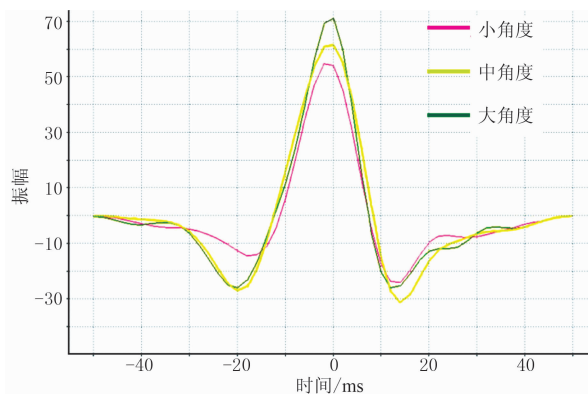


图 1 共角度地震子波

### 2.2.3 初始模型建立及横波资料估算

反演需要的初始模型包含纵波阻抗低频模型、横波阻抗低频模型和密度低频模型。

低频在反演过程中起着重要的作用。如图 2b 的高频反演结果虽然能使地层边界的定位比图 2a 精确,但反演阻抗与真实值相比,与图 2a 一样不能反映真实的岩石特性。而在图 2c 的低频反演结果中,虽然地层边界与图 2a 一样,但反演阻抗更接近真实值。可见低频在反演过程中能够:①降低地震资料反演结果的多解性;②降低调谐效应;③降低子波旁瓣效应的影响;④提高岩性解释的精度;⑤提高横向解释的连续性。

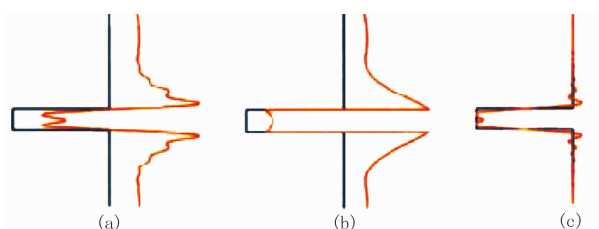


图 2 低频对反演结果影响示意图

(a)10~80Hz 反演结果; (b)10~500Hz 反演结果;

(c)0~80Hz 反演结果

黑色曲线为原始波阻抗模型,红色曲线为反演的波阻抗

在准确的井震标定基础上,通常可以得到理想的纵波阻抗模型。由于横波测井资料较少,横波阻抗模型的建立较为困难。仅利用已有横波测井资料建立横波阻抗模型,储层的横向变化趋势难以反映在模型中。因此,必须利用已有的纵波测井资料和其他测井解释成果,推断和计算地层的横波参数,进而建立横波阻抗模型。

在实际生产中,由于经济、技术等方面的原因,横波测井资料较少或资料精度较低,使得横波曲线的估算和校正 在测井数据中具有特殊的地位。横波的估算和校正一般有两种思路:一种是利用经验公式,建立纵波速度等参数与横波速度之间的函数关系,进而计算得到横波信息;另一种是通过岩石物理建模方法,通过对岩石结构中的各种矿物组成成分、矿物结构形式、孔隙形状及流体的研究,应用适当的岩石结构模型,结合流体替换理论估算横波信息。

实际工作中,为了在宏观上保证低频模型的合理可靠性,可以对直接由井震标定后的地震解释层位获得的低频模型进行约束。例如,用叠后声波阻抗反演获得波阻抗模型或者偏移速度分析获得的速度模型的趋势对叠前反演的低频模型进行约束。

#### 2.2.4 叠前 AVO 正演模拟与属性分析

进行叠前 AVO 正演模拟与分析的目的是确定

敏感参数。对于不同地区、不同储层的敏感参数不同。因此需要结合井资料进行 AVO 正演模拟,并对模拟结果进行分析,以确定敏感参数。同时需要对 AVO 正演数据和实际地震数据进行对比,分析不同角度局部叠加结果上可利用的 AVO 信息。

在获得了 AVO 敏感属性后,还需要将敏感属性剖面或者数据转化为具有地质意义的剖面或数据,以解决实际地质问题。由于这种转化并非一一对应的映射关系,所以通常以交会图的形式对敏感属性进行分析,以分析结果为基础建立统计映射关系。首先需要利用井资料对目的层做岩性或者流体与弹性参数的交会分析,分析结果作为映射关系依据或者图版。然后针对该目的层,将通过地震资料得到的相应弹性参数或者敏感属性依据映射关系绘制在平面上,生成岩性或者流体的平面分布图。

### 3 应用实例

研究区位于松南盆地中央坳陷区中部,地理位置位于乾安市以东让字井以南。研究区内构造形态整体为一呈北东走向的向斜,中间低两边高。以高台子油层青三段 10 砂组为目的层,属岩性油藏或岩性一构造油藏。在青山口组三段沉积时期,该区长期处于三角洲沉积相,可划分为三角洲前缘相和前三三角洲亚相。西南保康水系、西部通榆水系和东南怀德水系在该区沉积了一套河流三角洲砂岩体。同时,伴随振荡性的水进和水退及后期构造运动,为油气的聚集成藏提供了良好的生储盖组合,油藏具有单层薄、相变快的特点,储层砂岩在地震剖面上没有明显的地震响应,给储层预测带来很大的难度。通过对目的层进行储层物理响应和岩性及物性分析,寻找对储层反映最敏感的曲线作为储层特征参数。图 3 为关键井的测井地球物理响应交会图,从交会结果看,砂岩具有低伽马、中低声波时差、高电阻率的特点;相应的泥岩具有高伽马、中高声波时差、低电阻率的特点。图 4 为目的层段纵波阻抗与岩性统计直方图,可以看出,砂、泥岩纵波阻抗叠置严重、难以区分岩性。但是从岩石物理弹性参数交会图(图 5)可以看出,泊松比能很好地分辨岩性和含油性。因此制定了利用叠前反演来进行储层含油气性预测的方案(图 6)。



反演前首先对地震数据进行了分析和优化处理,尽可能得到高保真、高信噪比的地震资料,进而将其转换为角道集数据。

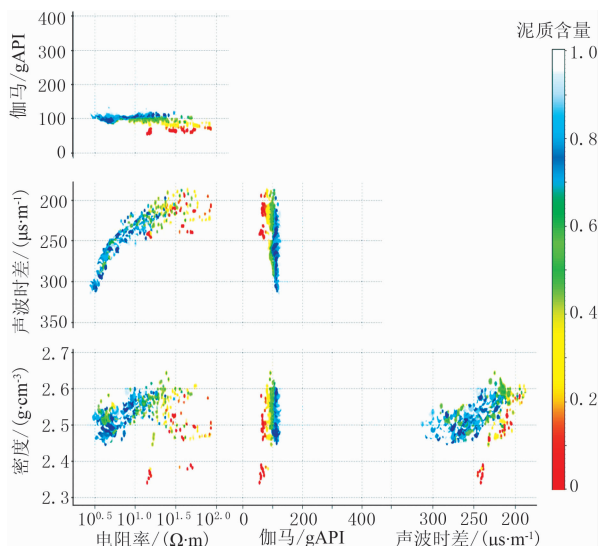


图 3 关键测井响应交会图

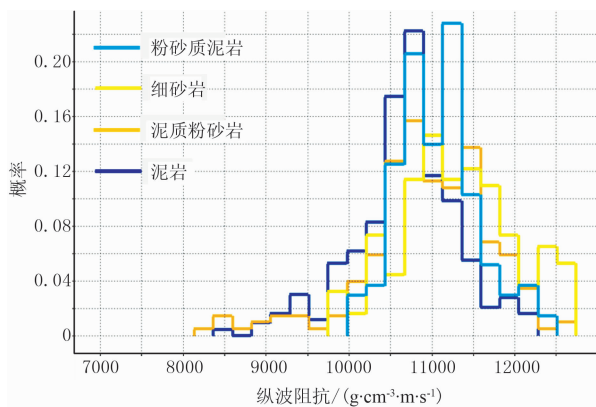


图 4 目的层段纵波阻抗与岩性统计直方图

然后对过关键井目的层段角道集数据进行扫描分析(图 7a~图 7c),获得叠加子体的最小和最大角度范围,并进行不同角道集子波的提取。整体来看,除去覆盖次数不均匀的边界数据集外,目的层段能完整接收的最大入射角约为 35°;同时考虑到近炮检距数据信噪比较低,需适当增大最小角度以减少多次波或其他干扰波的影响,因此将工区目的层段分角度叠加的角度范围控制在 5°~35°,并在此范围内将道集分为小、中、大三个子角度集(图 7d)。

其次是进行精细构造解释和初始模拟的建立。在初始模型的建立过程中,对测井资料的处理非常重要。由于在低频模型的建立中要用到大量的测井数据,尤其是声波测井数据和密度测井数据,而且当没有横波速度资料时,往往要使用测井资料进行横波速度的预测。而在使用这些测井资料时,必须首

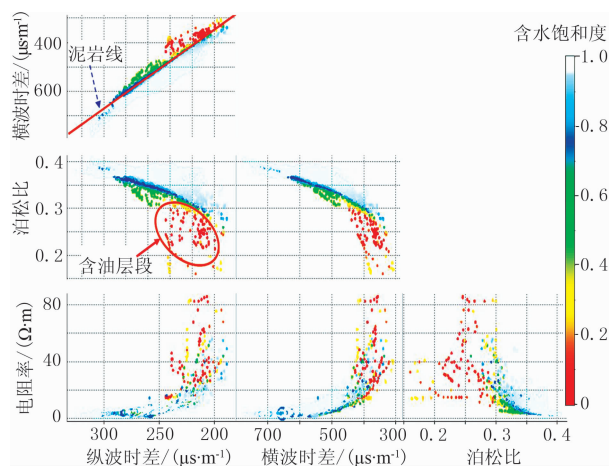


图 5 目的层段测井曲线弹性参数综合分析

淡蓝色为泥岩,蓝色、绿色为含水砂岩,黄色、红色为含油气砂岩

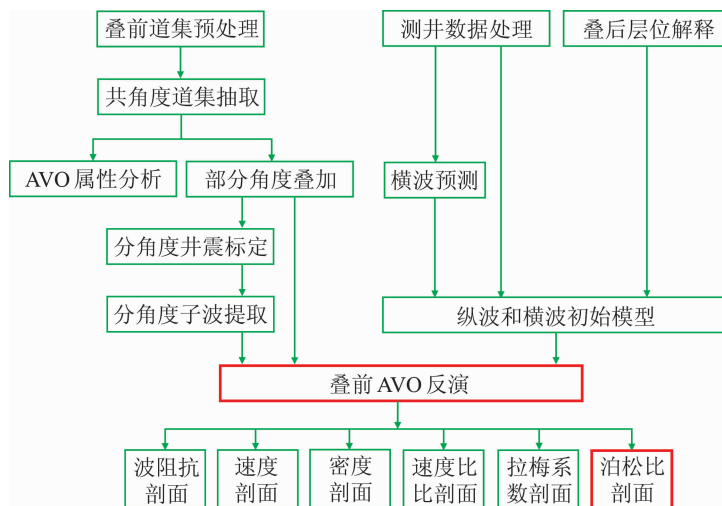


图 6 叠前反演流程

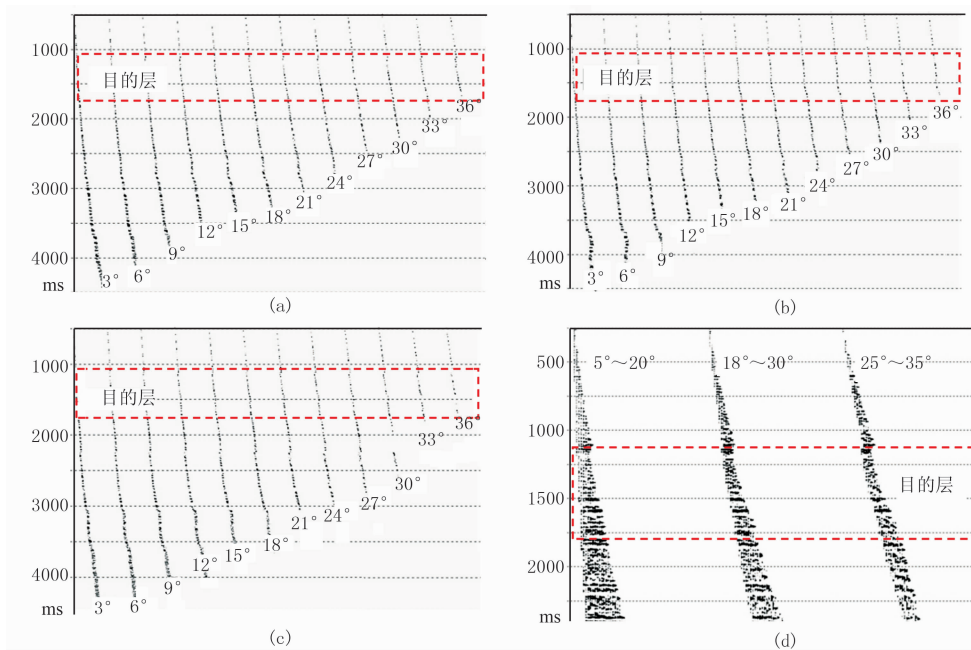


图7 对过关键井目的层段角道集数据进行扫描分析

(a)乾112井; (b)乾120井; (c)让60井; (d)角道集

先对这些测井资料进行必要的处理,例如环境校正、标准化等。然后利用地震、地质、测井资料建立纵横波阻抗初始模型。

最后是进行叠前 AVO 反演,获得纵波阻抗(图8)、横波阻抗(图9)以及泊松比(图10)等弹性参数,进而结合叠前 AVO 属性分析以及叠后属性分析技术进行含油气性综合预测,以减少反演结果

的多解性。反演结果表明泊松比可以指示含油气性,反演的泊松比和试油结果吻合较好(图11)。可以看出连井泊松比镂空剖面与试油结果(图12)基本吻合,但是也存在一些不吻合之处,其原因可能是叠前 AVO 反演受井控影响较大,而大部分井没有横波资料,其中部分井的横波速度差预测结果精度较低。

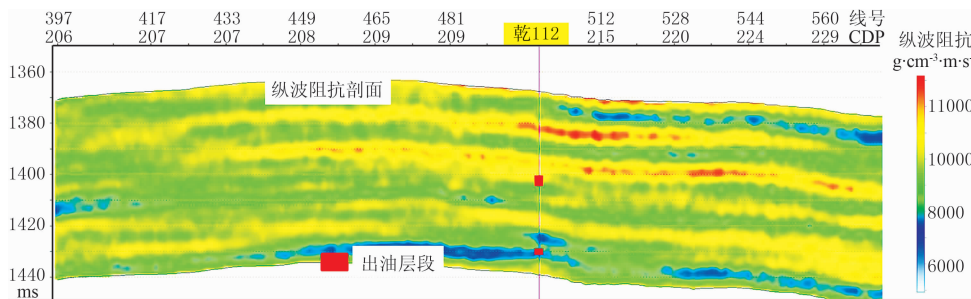


图8 过井纵波阻抗反演剖面

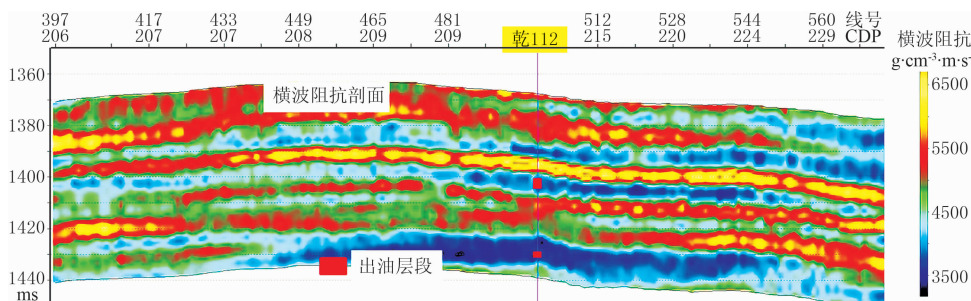


图9 过井横波阻抗反演剖面

图 13 为应用叠前反演结果和 AVO 属性成果参与的乾平 1 井,经验证储层预测准确,钻遇的层砂岩有油斑和油浸显示,证明该方法适用于薄层砂体储层含油气性预测工作。

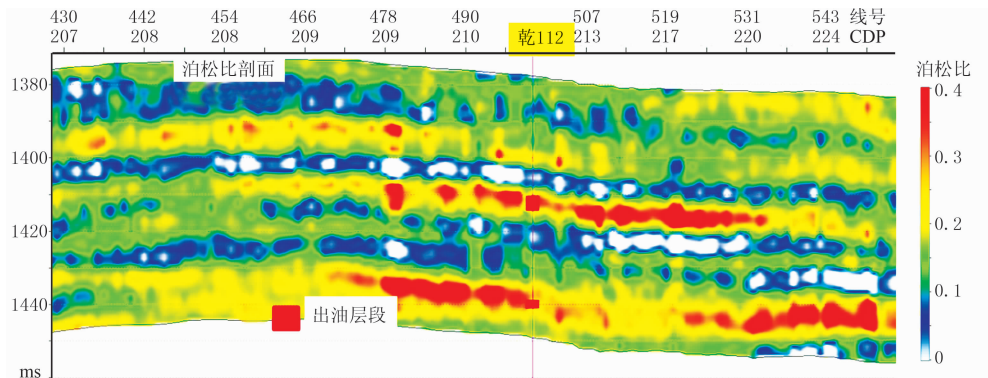


图 10 过井泊松比反演剖面(红色表示含油砂岩)

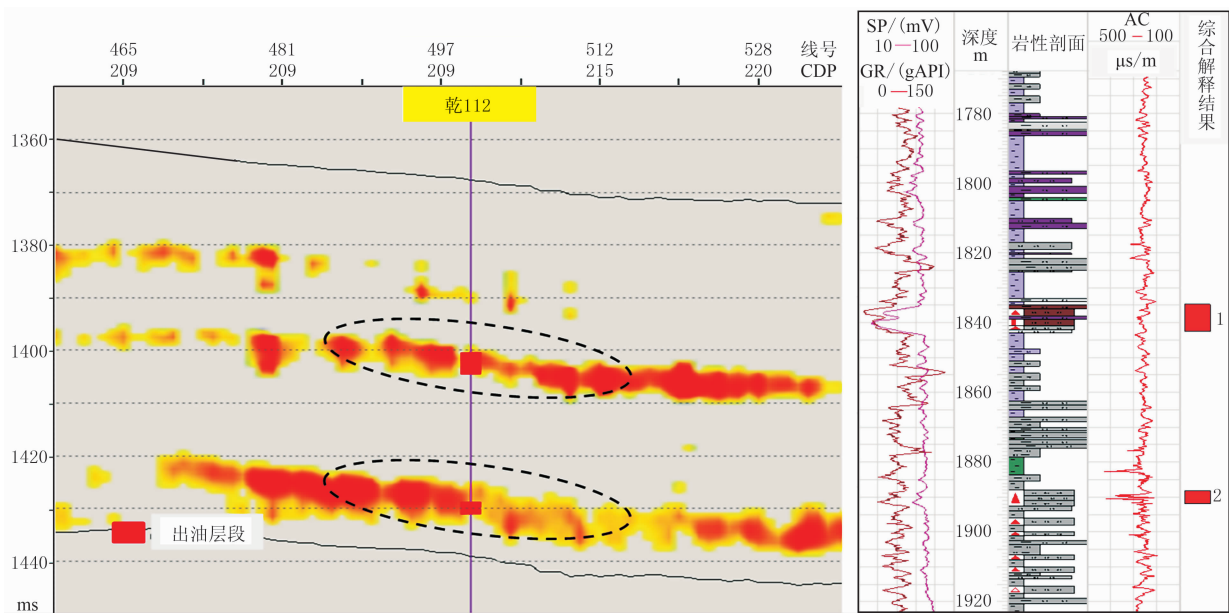


图 11 过关键井泊松比镂空剖面(左)与试油结果(右)对比图

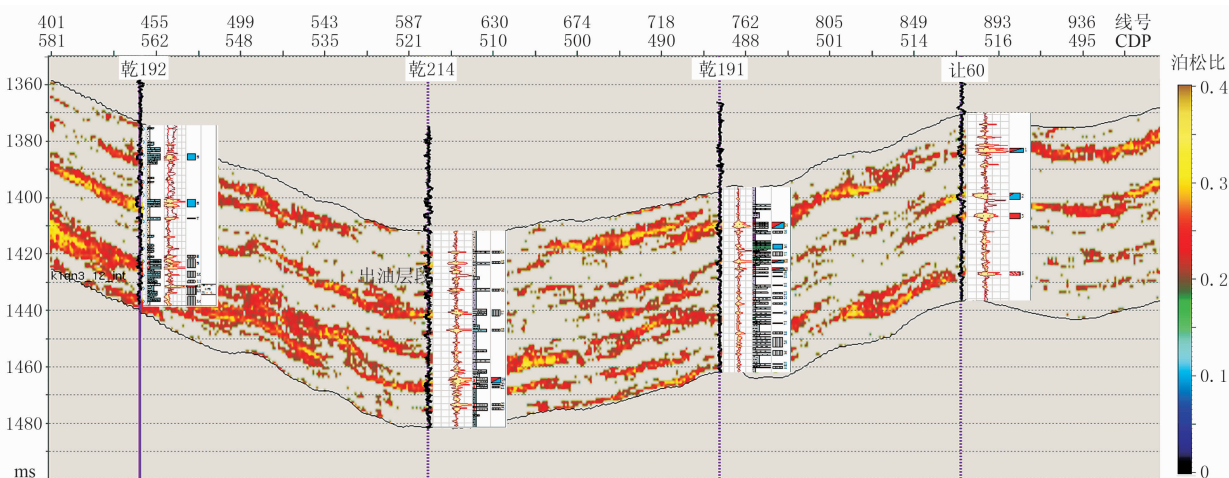


图 12 连井泊松比镂空剖面与试油结果叠合图



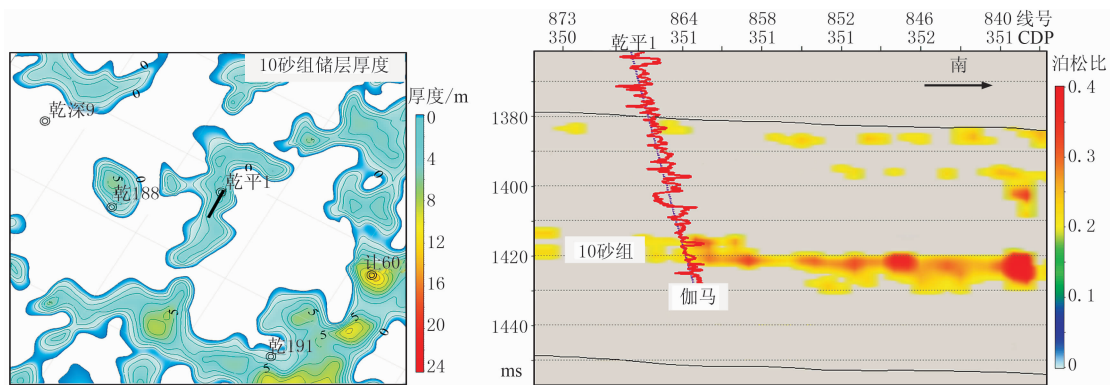


图 13 乾平 1 井 10 砂组储层厚度预测结果(左)及过井镂空泊松比剖面(右)

## 4 结束语

叠前 AVO 反演可以获得比叠后反演更丰富的信息,从而更可靠地揭示出储层的展布以及储层的含油气性。在实际应用中,要结合工区的地质特点,做好测井资料的处理、角度子波的提取以及叠前属性交会分析,同时也需要针对性的保幅处理,才能在实际应用中取得较好的应用效果。

叠前 AVO 反演需要准确的横波速度,而通常情况下,横波测井资料并不是十分丰富,因此选择适合工区的横波预测方法十分重要。

反演不可避免地存在多解性,因此多种含油气预测技术的综合应用仍然是比较实际的选择。

### 参考文献

- [1] 印兴耀,孔栓栓,张繁昌等. 基于差分进化算法的叠前 AVO 反演. 石油地球物理勘探,2013,48(4):591-596.  
Yin Xingyao, Kong Shuanshuan, Zhang Fanchang et al. Prestack AVO inversion based on differential evolution (DE) algorithm. OGP, 2013, 48(4):591-596.
- [2] 陈建江,印兴耀,张广智. 层状介质 AVO 叠前反演. 石油地球物理勘探,2006,41(6):656-662.  
Chen Jianjiang, Yin Xingyao, Zhang Guangzhi. Prestack AVO inversion for layered medium. OGP, 2006, 41(6):656-662.
- [3] 王保丽,印兴耀,张繁昌等. 基于 Fatti 近似的弹性波阻抗方程及反演. 地球物理学进展,2008,23(1):192-197.  
Wang Baoli, Yin Xingyao, Zhang Fanchang et al. Elastic impedance equation based on Fatti approximation and inversion. Progress in Geophysics, 2008, 23(1):192-197.
- [4] 苑书金,董宁,于常青. 叠前联合反演 P 波阻抗和 S 波阻抗的研究和应用. 石油地球物理勘探,2005,40(3):339-342.  
Yuan Shujin, Dong Ning, Yu Changqing. The study on jointly application of prestack P-impedance and S-

impedance. OGP, 2005, 40(3):339-342.

- [5] 吴志强,田志福,丁国栋等. 鄂尔多斯盆地塔巴庙工区下石盒子组砂岩储层综合预测技术. 石油物探,2000,39(3):26-35.  
Wu Zhiqiang, Tian Zhifu, Ding Guodong et al. Integrated prediction techniques for sand reservoirs at lower Shihezi formation of Tabamiao area in Ordos Basin. GPP, 2000, 39(3):26-35.
- [6] 武丽,施伟,董宁等. 鄂尔多斯盆地塔巴庙区块下石盒子组砂岩储层含气性预测. 地质力学学报,2005,11(3):226-235.  
Wu Li, Shi Wei, Dong Ning et al. Prediction of gas potentials of sand reservoirs of the lower Shihezi formation in the Tabamiao Area, Ordos Basin. Journal of Geomechanics, 2005, 11(3):226-235.
- [7] 张津海,张远银,孙赞东. 道集品质对叠前 AVO/AVA 同时反演的影响. 石油地球物理勘探,2012,47(1):68-73.  
Zhang Jinhai, Zhang Yuanyin, Sun Zandong. The effect of quality of gathers on AVO/AVA simultaneous inversion. OGP, 2012, 47(1):68-73.
- [8] 李国发,张小明,彭更新等. 与炮检距有关的地层吸收对 AVO 分析的影响及其补偿方法. 石油地球物理勘探,2014,49(1):89-94.  
Li Guofa, Zhang Xiaoming, Peng Gengxin et al. Effects of offset related formation absorption on AVO analysis and its compensation method. OGP, 2014, 49(1):89-94.
- [9] Shuey R T. A simplification of the Zoeppritz equations. Geophysics, 1985, 50(4):609-614.
- [10] Fatti J, Smith G, Vail P et al. Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: a 3D seismic case history using the Geostack technique. Geophysics, 1994, 59(11):1362-1376.

(本文编辑:宜明理)

### 作者简介



李建华 高级工程师,1973 年生;1995 年毕业于长春地质学院矿场地球物理专业,获学士学位;一直在东方地球物理公司研究院地质研究中心从事储层地震描述与油藏地球物理领域的生产与科研工作。