

文章编号: 1671 - 8585(2009)02 - 0133 - 05

# 碳酸盐岩裂缝型储层叠前地震预测技术应用

邓道静

(中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院南京石油物探研究所, 江苏南京 210014)

**摘要:**随着宽方位、大偏移距采集方法的应用,叠前地震道集所蕴含的丰富地震信息越来越受到人们的重视。介绍了叠前各向异性介质裂缝检测的原理,对利用 P 波振幅方位各向异性分析技术(AVA)及 P 波方位 AVO 模拟方法(AVOA)开展碳酸盐岩裂缝型储层叠前地震预测的技术进行了阐述,给出了新疆某地区实际资料地震预测的裂缝发育方位图,与井中实测结果吻合较好。

**关键词:**碳酸盐岩;各向异性;叠前地震;裂缝检测;储层预测

**中图分类号:**P631.4

**文献标识码:**A

随着三维 P 波方位分析方法的日益普及,宽方位、大偏移距采集方法越来越受到勘探物理学家的重视,叠前地震道集所蕴含的丰富地震信息有望在不断的探索中获得汲取及应用。叠前 P 波方位各向异性研究能够兼顾效益及有效性(与 S-S 波法、S-P 波法相比),基于方位的 P 波各向异性研究已经成为探测地下地质体裂缝发育程度的一种很好的地球物理手段。本文介绍利用 P 波振幅方位各向异性分析技术(AVA)和 P 波方位 AVO 模拟方法(AVOA)开展碳酸盐岩裂缝型储层叠前地震预测的技术。

## 1 叠前各向异性裂缝检测的原理

利用叠前方位各向异性检测裂缝一直以来被作为研究特殊油气藏的非常规手段而受到普遍关注。人们已经提出了许多基于两类弱各向异性介质(HTI 具有水平对称轴和 VTI 具有垂直对称轴的横各向同性介质)与方位角  $\varphi$  有关的 AVO 反射系数公式,如 Wright(1986)反射系数方程<sup>[1]</sup>。

1) 均匀介质中入射角为  $\theta$  时,有

$$R(\theta) = R(0) + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta v_p}{v_p} - \left( \frac{2v_s}{v_p} \right)^2 \cdot \frac{\Delta G}{G} \right\} \cdot \sin^2 \theta \quad (1)$$

式中:  $R(0) = \frac{\Delta Z}{2Z}$ ,  $Z$  和  $\Delta Z$  为界面上下平均波阻抗及差值;  $G = \rho v_s^2$ ;  $\Delta G$  为界面上下平均垂直剪切模量差值。

2) 方位各向异性介质、具有水平对称面条件下,方程为

$$R(\theta, \varphi) = R(0) + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta v_p}{v_p} - \left( \frac{2v_s}{v_p} \right)^2 \frac{\Delta G}{G} \right\} \cdot \sin^2 \theta$$

$$\left[ \Delta \gamma + 2 \left( \frac{2v_s}{v_p} \right)^2 \Delta \omega \right] \cos^2 \varphi \sin^2 \theta \quad (2)$$

式中:  $\Delta \omega$ ,  $\Delta \gamma$  分别为横波分裂参数和 Thomsen 各向异性系数差值。

与式(2)类似的反射系数表达式都可进一步转化为以下简便的关系:

$$R(\theta, \varphi) = A(\theta) + B(\theta) \cdot \cos 2\varphi \quad (3)$$

$$R(\theta, \varphi) = P(\varphi) + G(\varphi) \cdot \sin^2 \theta \quad (4)$$

式(3)表示入射角(偏移距)上振幅随方位的变化,式(4)则为我们熟悉的 Shuey AVO 近似公式。

从式(3)和式(4)可以看出,对于非接近临界角的入射,用简单的三角函数描述与方位有关的各向异性对反射系数的贡献是有效的。当  $\varphi = 0^\circ$  时得到弱各向异性介质中各向同性面上的反射系数公式,它和在各向同性介质中的 Shuey 近似式相同,AVO 及其派生的一系列属性参数反映的是各向同性面上基质介质的入射及反射关系。随着观测方位  $\varphi$  偏离各向同性面,与各向异性有关的影响将引起入射及反射的变化,在垂直裂缝 HTI 介质中,这种变化将呈  $180^\circ$  周期变化的规律。AVO 及其属性参数的这种方位变化显然与各向异性有关,通过随方位变化的振幅或 AVO 属性参数模拟,方位 P 波就成为检测裂缝性油气藏中裂缝及裂缝发育方向的一种很有效的地球物理手段<sup>[2~12]</sup>。

在上述方程中虽然只需 3 个方位数据就可求解与裂缝发育方向及强度相关的调谐因子,但求一个满足全方位超定方程的  $n$  阶范数合解,能最大程

收稿日期: 2008 - 11 - 04; 改回日期: 2009 - 01 - 05。

作者简介: 邓道静(1968—),男,硕士,2007年毕业于成都理工大学信息工程学院地质工程专业,现主要从事地震资料解释与油藏描述方面的研究工作。

度上抑制叠前道集的噪声分布,同时应结合储层特征分析及正演模拟进行有效的应用。

从实际检测来讲,影响方位振幅及 AVO 响应的因素很多,除炮检距和方位分布外,影响比较大的还有采集偏差、地下构造的变化、目的层基质纵横波速度比、上覆地层非均匀性等因素。

因此,实际工作中应该考虑到因公式简化带来的损失。

## 2 叠前地震预测技术

塔河油田奥陶系油藏裂缝、溶洞系统发育,储层非均质性严重,地震响应特征复杂,储层预测困难。裂缝型储集层作为塔河地区奥陶系灰岩的主要储集类型之一,既是主要的渗滤通道,又是主要的储集空间。因此,开发一套针对碳酸盐岩裂缝型储层的叠前地震预测技术,具有相当的实际应用价值。

### 2.1 资料预处理

选取塔河南部托甫台地区一块三维地震资料,面积  $671.8 \text{ km}^2$ , 48 次覆盖,面元大小  $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ ,进行了前期常规地震保幅处理工作,主要包

括道编辑、带通滤波、真振幅恢复、静校正、速度分析、剩余静校正、地表振幅一致性补偿、叠前反褶积及动校正等。

### 2.2 宏面元抽取及不同方位均匀道集的形成

为了提高信噪比,避免炮检距分布不匀带来的弊端,并保证在不同方位上有足够密度的不同炮检距道集分布、较一致的叠加次数,我们通过扩大原 CMP 面元的手段建立 CMP 宏面元。考虑到工区目的层构造起伏不大,但储层横向变化大等特点, CMP 宏面元的尺寸应选择与方法适用的最小范围内。采用不断扩大原始 CMP 道集尺寸( $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ )的方法,不断制作炮检距-方位角分布图,直到交会点重复出现或不扩大到新区为止。通过数个条带纵横作图,最终选定 CMP 宏面元尺寸为  $75 \text{ m} \times 75 \text{ m}$ 。但宏面元之间有滑动,仍保持 CDP 面元点距为  $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ 。形成宏面元之后的测线可保证在 6 个方位上都有 48 次叠加次数,并在  $2850 \text{ m}$  内全偏移距数据均匀分布。利用邻近 CDP 线元同一方位,炮、检相邻的道进行部分叠加,提高叠前资料信噪比,增强有效信号能量,并保证不同方位叠加次数基本一致(图 1)。

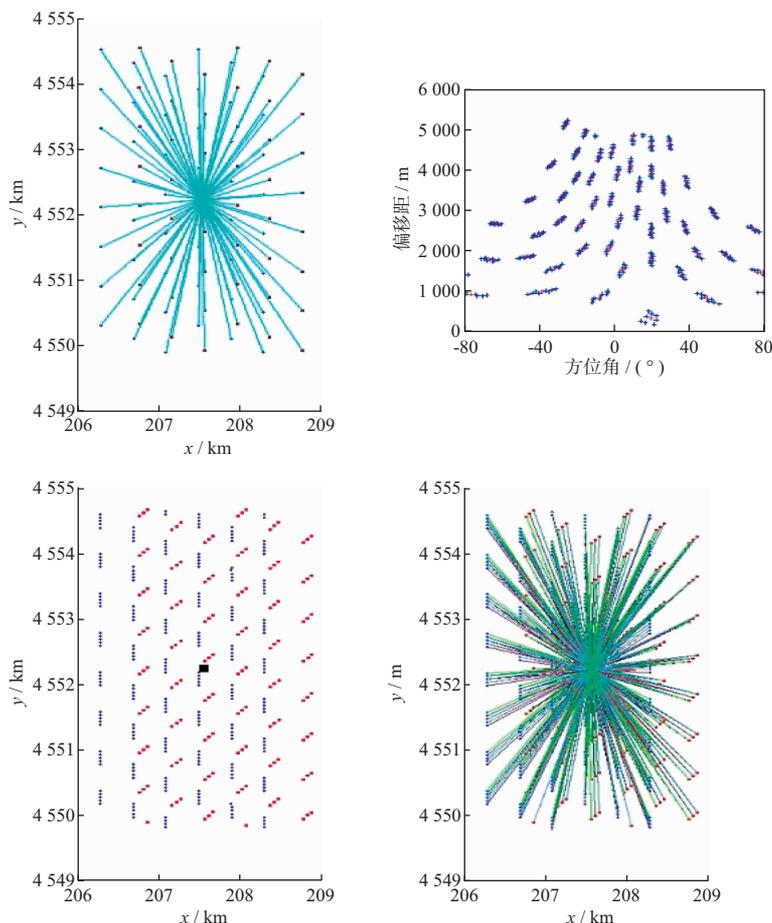


图 1 邻近 CDP 线元叠加前后方位道集分布

### 2.3 道集内能量均衡处理

宏面元大约由原始相邻 8 个 CDP 面元组成,同相轴受动校速度横向变化的影响,组成 CMP 宏面元后,相邻道上可能出现一定的振幅差,在裂缝分析之前的叠前道集上保证这种时差的可靠性是至关重要的。进行相邻道(位于同一炮检方向,并为同一炮点、相邻检波点或同一检波点、相邻炮点的道)的局部叠加处理(一般为 4 道),可以提高有效反射波的能量及信噪比,沿方位压制与裂缝无关的其他信号。

### 2.4 形成方位道集

为了使随方位角变化的数据更稳定以及增加方位角上数据道的密度,对方位边界实施了部分重叠处理,范围一般控制在  $2.5^{\circ} \sim 5.0^{\circ}$ 。抽取的方位道集有两种:一是以  $10^{\circ}$  的间隔将数据分选成从

心角度  $N5^{\circ}$  到  $N175^{\circ}$  的 18 个方位道集(各道集间重叠  $2.5^{\circ} \sim 5.0^{\circ}$ ),该道集数据直接用于方位振幅及方位 AVO 参数的模拟计算;二是完全考虑原叠加次数达到 48 次的要求,并考虑进行叠后偏移处理,将数据分选为 6 个角度:  $0^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ,  $23^{\circ} \sim 65^{\circ}$ ,  $53^{\circ} \sim 104^{\circ}$ ,  $76^{\circ} \sim 127^{\circ}$ ,  $115^{\circ} \sim 157^{\circ}$ ,  $145^{\circ} \sim 180^{\circ}$ , 对应的中心角分别为  $15^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$ ,  $105^{\circ}$ ,  $135^{\circ}$ ,  $165^{\circ}$ (图 2)。

### 2.5 形成方位角度道集<sup>[13]</sup>

由于在时间-偏移距域和时间-入射角域的地震道具有不同的特点及表现形式,为了便于观测和分析地震反射振幅随入射角的变化,我们把固定炮检距道的记录转换成固定入射角(或一定角度范围内叠加)的道集记录。该记录除了可用于方位各向异性处理外,还可用于叠前振幅随入射角 AVA 纵横波联合反演(图 3)<sup>[14~15]</sup>。

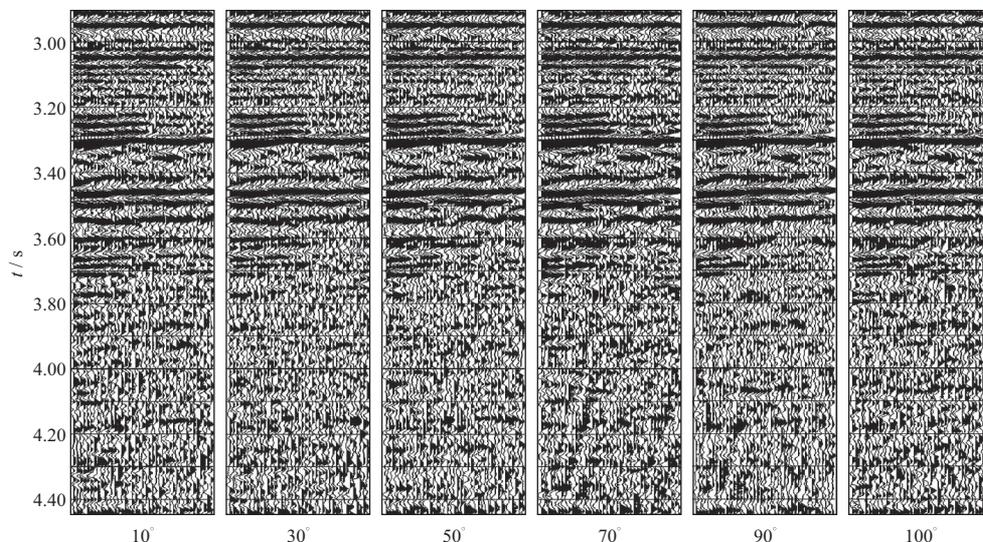


图 2 不同角度的方位道集剖面

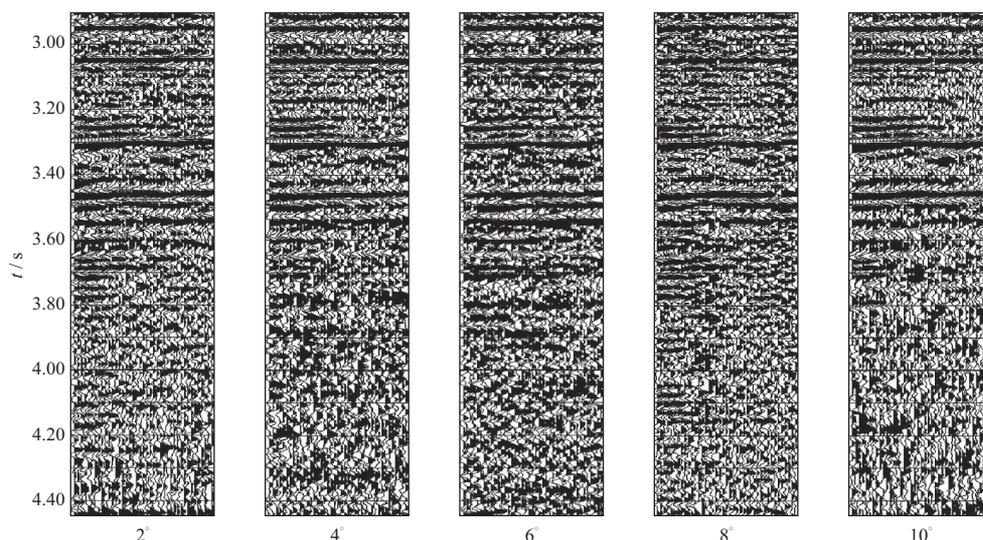


图 3 不同入射角的方位道集剖面

## 2.6 叠前方位道集和方位角度道集归一化

随着入射角的不断减小并接近于垂直入射,理论上不同方位道集上的有效反射波的反射振幅应向同一个振幅值收敛,即趋于垂直入射反射振幅。为了使垂直入射时 AVOA 曲线收敛到相同的振幅,必须将每个方位的 AVOA 响应归一化到它的垂直入射 P 波振幅上,具体做法如下:将一宏面元中所有方位角度道集提取的垂直入射地震道进行叠加,并计算垂直入射叠加道的包络  $P_{st}$ ;用叠加包络  $P_{st}$  的每个采样除以宏面元中各个方位角度道集的垂直入射地震道的包络  $P_{env}$ ,得到每个方位角度道集的归一化标定地震道  $P_{nor}$ ,即  $P_{nor} = P_{st} / P_{env}$ ;将每个方位的归一化标定地震道乘以该方位上方位道集中的每个炮检距道及方位角度道集中的每个角度道,实现每个方位道集及方位角度道集的归一化。

## 2.7 形成方位叠加道

在叠前方位道集和方位角度道集归一化的基础上,对叠前方位道集和方位角度道集进行叠加。原则上选取信噪比较高、入射角较大(小于临界角)、各方位道集相对均匀的区段进行叠加,其目的是:①选择最佳入射条件;②消除噪声的影响,使叠加道振幅更加可靠。靶区资料方位角度道集中采用的入射角叠加范围为  $14^{\circ} \sim 18^{\circ}$ (已有的最大范围),每个方位角只产生一道。此外,还能通过叠前方位角度道集叠加得到小入射角度范围( $1^{\circ} \sim 5^{\circ}$ )方位叠加道,再由大入射角叠加道减小入射角叠加道得到方位能量包络差叠加道。能量包络是输入道记录经 Hilbert 变换得到的结果,为了获得能量包络差叠加道,必须先分别计算大入射角叠加道与小入射角叠加道的能量包络,然后用大入射角叠加道的能量包络减去小入射角叠加道的能量包络。为了减少噪声的影响,处理中还对能量包络沿时间方向作了平滑处理。

## 2.8 裂缝整体发育趋势预测<sup>[16]</sup>

裂缝发育趋势预测有两种方法。一种方法是采用 Wright(1986)方位各向异性介质具有水平对

称面条件下的反射系数方程,通过在固定入射角下地震参量随方位的变化(式(4)),或沿特定方位获得的 Shuey 近似(式(5)),利用三角近似式模拟与方位调谐相关的参量,预测裂缝发育密度及走向,模拟量初步选振幅能量、AVO 梯度因子等。另一种方法是利用 HTI 方程在笛卡儿坐标系的极化椭圆方程,通过椭圆拟合求扁率及长轴走向,预测裂缝发育密度及方向。两种方法都利用足够多的方位道集构成超定方程,求得最大满足有误差拟合样本的最小二乘解,它从某种程度上代表裂缝的整体发育趋势。

## 3 实际应用效果分析

对塔河南部某井区的实际资料进行了叠前地震预测研究,结果如图 4 和图 5 所示。图 4 为采用上述方法预测的裂缝发育方位图,图 5 为对应井中实测的裂缝发育方位图。实测岩心显示,A 井在 6 028.00~6 032.00 m 井段为褐灰色油迹砂屑泥晶灰岩,差油气层;6 042.00~6 044.00 m 井段为黄灰色泥晶灰岩,气测异常层。B 井在 5 856.66~5 878.57 m 井段裂缝比较发育,见 288 条,裂缝长度

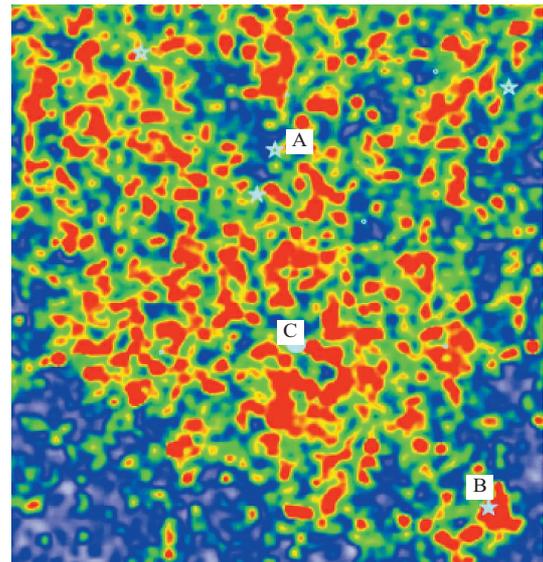


图 4 地震预测的裂缝发育方位

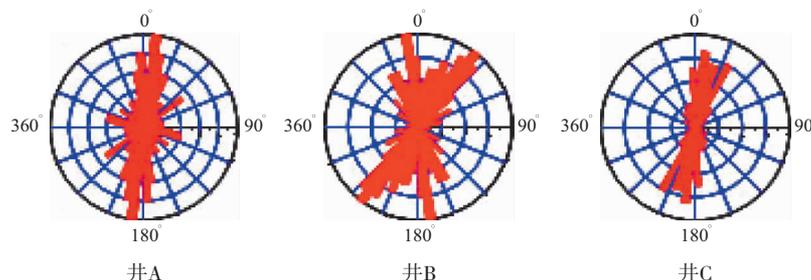


图 5 井中实测裂缝发育方位

10~120 mm;5 862.00~5 876.70 m 井段见 231 个孔洞,大部分裂缝、孔洞含油,少量裂缝、孔洞被方解石或泥质充填;6 112.00~6 120.00 m 井段有裂缝 73 条,密度为 12 条/m,长度为 10~130 mm;6 151.00~6 157.00 m 井段有裂缝 71 条,密度为 12 条/m,长度为 20~70 mm;6 073.00~6 102.00 m 测井解释为 III 类储层。C 井常规完井,6 010.59~6 070.50 m 为油气层。通过对比可以发现文中方法预测结果真实、有效,与实际检测结果吻合较好。

#### 4 总结

宽方位采集为利用地震资料预测裂缝方位提供了条件,通过分方位振幅对比,能够较好地预测裂缝方位。在塔河油田某井区,探索了一套利用 P 波振幅方位各向异性分析技术(AVA)及 P 波方位 AVO 模拟方法(AVOA)开展碳酸盐岩裂缝型储层地震预测的技术。实际应用结果表明,应用文中介绍的方法进行预测的结果具有较高的可信度,结合该地区的古地形、古地貌及残丘、溶沟、水系等地貌特征研究成果,可以实施不同裂缝单元体的划分,为该区裂缝型储层的滚动开发和评价提供依据。

#### 参 考 文 献

- 1 Wright I. The effects of anisotropy on reflectivity[J]. Expanded Abstracts of 54<sup>th</sup> Annual International SEG Meeting, 1984, 670~672
- 2 Perez M A, Gibson Jr R L. Detection of fracture orientation using azimuthal variation of P-wave AVO responses; Barinas field (Venezuela) [J]. Expanded Abstracts of 67<sup>th</sup> Annual International SEG Meeting, 1997, 1 353~1 356
- 3 Ruger A. Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media [J]. Expanded Abstracts of 66<sup>th</sup> Annual International SEG Meeting, 1996, 1 810~1 813
- 4 Mallick S, Frazer L N. Reflection/transmission coefficients and azimuthal anisotropy in marine seismic studies[J]. Geophysics Journal International, 1991, 105(1): 241~252
- 5 Perez M A. 利用各种地震方法检测碳酸盐岩储层中的裂缝[J]. 蒋录全译. 石油物探译丛, 2000, 23(1): 60~71
- 6 Perez M A. 利用 P 波 AVO 响应的方位变化检测裂缝方向[J]. 郭庭超译. 石油物探译丛, 2000, 23(1): 47~59
- 7 Pérez M A, Grechka V, Michelena R J. Fracture detection in a carbonate reservoir using a variety of seismic methods [J]. Geophysics, 1999, 64 (4): 1 266~1 276
- 8 Mallick S, Craft K L, Meister L J, et al. Determination of the principal directions of azimuthal anisotropy from P-wave seismic data [J]. Geophysics, 1998, 63 (2): 692~706
- 9 Mallick S, Craft K L, Meister L J, et al. Computation of the principal directions of azimuthal anisotropy from P-wave seismic data [A]. In: Macbeth C, Lynn H B. Applied seismic anisotropy: Theory, background, and field studies [C]. USA: Soc of Expl Geophys, 2000. 682~685
- 10 Perez M A, Gibson R L, Toksoz N. Detection of fracture orientation using azimuthal AVO responses [J]. Geophysics, 1999, 64(4): 1 253~1 265
- 11 Perez M A, Grechka V, Michelena R J. Fracture detection in a carbonate reservoir using a variety of seismic methods [J]. Geophysics, 1999, 64(4): 1 266~1 276
- 12 Wang Z, Mallick S, Frazer L N, et al. Reflection/transmission coefficients and azimuthal anisotropy in marine seismic studies [A]. In: Macbeth C, Lynn H B. Applied seismic anisotropy: Theory, background, and field studies [C]. USA: Soc of Expl Geophys, 2000. 246~257
- 13 袁江华, 刘洪, 首皓, 等. 面向目标的叠前角度道集提取策略 [J]. 石油物探, 2007, 46(4): 334~338
- 14 孟宪军, 慎国强, 王玉梅, 等. 叠前 AVA 地震纵横波阻抗同步反演技术研究 [J]. 石油物探 (增刊), 2004, 43 (1): 53~55
- 15 李爱山, 印兴耀, 张繁昌, 等. 叠前 AVA 多参数同步反演技术在含气储层预测中的应用 [J]. 石油物探, 2007, 46(1): 64~94
- 16 李红梅, 石林光, 杨玉龙. 叠前地震属性处理及综合解释技术 [J]. 石油物探, 2004, 43 (增刊): 42~47

(编辑:戴春秋)