

· 处理技术 ·

# 各向异性假设条件下三维 VSP 与地面地震数据 旅行时差分析及参数求取

孙祥娥\*<sup>①②③</sup> 凌云<sup>①</sup> 高军<sup>①</sup> 孙德胜<sup>①</sup> 林吉祥<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>东方地球物理公司油藏地球物理研究中心,河北涿州 072751;<sup>②</sup>东方地球物理公司  
博士后工作站,河北涿州 072751;<sup>③</sup>长江大学电信学院,湖北荆州 434023)

孙祥娥,凌云,高军,孙德胜,林吉祥.各向异性假设条件下三维 VSP 与地面地震数据旅行时差分析及参数求取.  
石油地球物理勘探,2009,44(6):720~725

**摘要** 由于本文研究对象处在  $T_4$ (3200m)以上,地层构造相对平缓,速度场空间变化较小,断裂或裂缝方向发育单一,因此从 VTI 介质和 HTI 介质的假设条件出发,研究了利用三维 VSP 数据和地面地震数据联合求解各向异性参数的方法,分析了 HTI 介质的空变特点。研究表明:研究区的介质具有明显的 VTI 性质和 HTI 特点,通过求取 VTI 各向异性参数和分析 HTI 介质的空间相对变化,获得了较小的地震波旅行时时差。根据 HTI 介质空间相对变化与实际裂缝空变具有一定的一致性的特点,可进行裂缝储层的有效预测。

**关键词** 三维 VSP 全方位地面地震 VTI HTI 各向异性参数

## 1 引言

19 世纪末各向异性理论被引入地球物理学领域<sup>[1]</sup>。在 20 世纪 70 年代末至 80 年代初, Berryman 等人开始了薄储层各向异性特征研究<sup>[2~5]</sup>,重新引起人们对各向异性介质问题的关注;随后 Tsvankin 等人开始各向异性介质反射波时距曲线方程的研究<sup>[6,7]</sup>; Schoenberg 等人开展了对裂缝参数的估计<sup>[8,9]</sup>,为实际各向异性地震资料处理提供了理论依据。由于 VTI 介质能够描述水平薄互储层的地质现象, HTI 介质能够描述垂直裂缝带储层地质现象,促使 TI 介质理论越来越多地应用于现今的地震数据处理中。本文将利用三维 VSP 和全方位地面地震数据,结合研究区地质背景,研究求解各向异性参数的方法及各向异性对地震波传播的影响,以提高描述地下裂缝的能力。

## 2 方法研究

文中实际数据为零井源距 VSP 数据、三维

VSP 数据和全方位的地面地震数据。由于研究区目的层  $T_4$ (3200m)以上地层构造相对平缓,速度场空间变化较小,断裂或裂缝方向发育较为单一,可以认为  $T_4$  以上的地层具有 VTI 介质特征和单一方向断裂引起的 HTI 介质特征。

通过零井源距 VSP 数据可以获得 200~3900m 范围内间距 10m 的垂直反射速度和垂直反射时间。三维 VSP 的观测范围为 276~2700m,观测点间距为 15.24m,炮点激发面积为 30km<sup>2</sup>,全方位地面地震的覆盖面积为 30km<sup>2</sup>,CMP 面元为 25m×25m。为求取该深度范围内 VTI 介质各向异性参数、裂缝 HTI 参数,分析各向异性对裂缝的影响,提供了丰富可靠的研究数据。

### 2.1 各向同性假设条件下正演旅行时与三维 VSP 初至时差分析

根据研究区的地质结构特点,首先假设地下介质为水平层状各向同性介质,利用零井源距 VSP 数据求出垂直反射时间  $t_{0,i}$  和速度  $v_{\text{nmo},i}$ ,计算各激发点至各级检波器的最小旅行时  $t_{1,ij}$ ,并分析每一个深度点处二者之差

$$\Delta t_{1,ij} = t_{ij} - t_{1,ij} \quad (1)$$

\* 湖北省荆州市长江大学电信学院,434023

本文于 2009 年 4 月 23 日收到,修改稿于同年 5 月 21 日收到。

其中:  $i$  为检波器级数,  $i \in [1, 160]$ ;  $j$  为炮点编号,  $j \in [1, N]$ ,  $N$  为总炮数;  $t_{ij}$  为三维 VSP 的初至时间。图 1a、图 1c 中蓝色散点分别表示 1981m 和 2596m 深度处的  $\Delta t_{1,ij}$  与井源距的关系, 同一深度处

的  $\Delta t_{1,ij}$  随着井源距的增加而增加, 相同井源距时深度越大,  $\Delta t_{1,ij}$  相对较小。1981m 深度、3000m 井源距的  $\Delta t_{1,ij}$  大于 100ms, 2591m 深度、3000m 井源距的  $\Delta t_{1,ij}$  接近 100ms。由此可见, 正演旅行时与三维

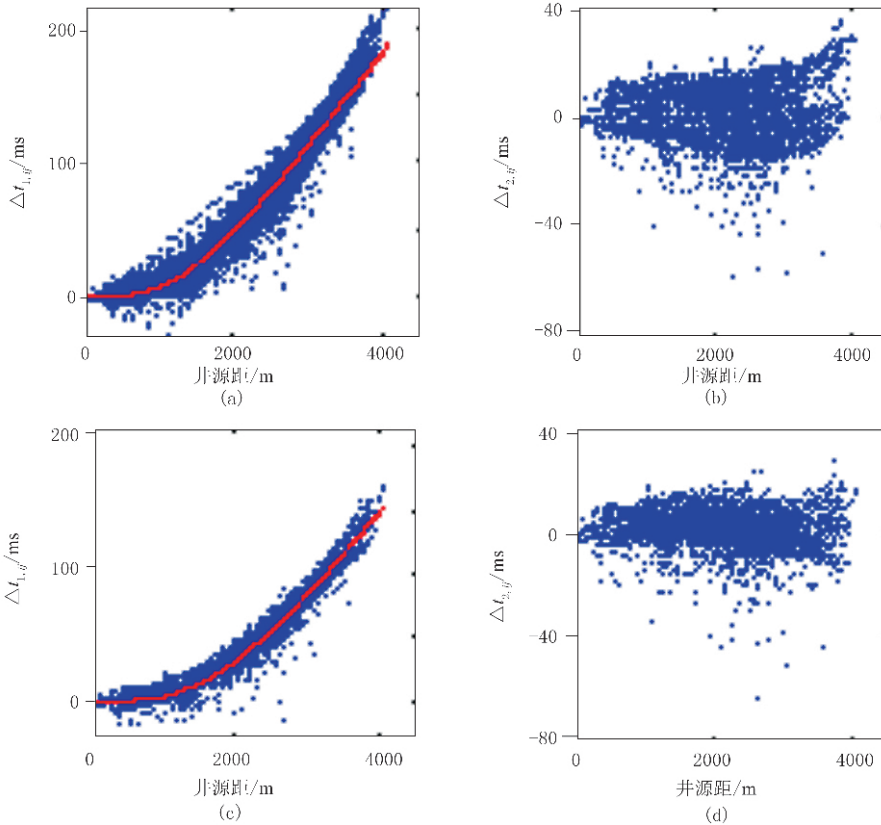


图 1 正演旅行时与 VSP 数据初至时差随井源距变化关系图

(a)各向同性假设, 1981m; (b)VTI 假设, 1981m; (c)各向同性假设, 2591m; (d)VTI 假设, 2591m

VSP 资料的初至时误差较大, 说明水平层状的各向同性介质假设不能描述研究区中浅层介质的地震波传播特性。

### 2.2 VTI 假设条件下正演旅行时与 VSP 数据初至时差分析

进一步假设地下介质为垂直横向各向同性 VTI 介质, Alkhalifah<sup>[7]</sup> 等给出了 TI 介质中地震波旅行时的计算公式为

$$t_{2,ij}^2 = t_{0,i}^2 + \frac{x_{ij}^2}{V_{\text{nmo},i}^2} - \frac{2\eta_i x_{ij}^4}{V_{\text{nmo},i}^2 [t_{0,i}^2 V_{\text{nmo},i}^2 + (1 + 2\eta_i) x_{ij}^2]} \quad (2)$$

式(2)中前两项为各向同性条件下的旅行时平方, 即  $t_{1,ij}^2$ ;  $\eta_i$  为弱各向异性参数, 第 3 项为弱各向异性时差偏离双曲线的修正量, VSP 数据初至时差与各向异性时差可以表示成  $t_{ij} - t_{2,ij}$ , 在最小平方误差的原

则下, 利用扫描方法可以求出使式(3)中  $\epsilon$  最小的各向异性参数  $\eta$ 、 $t_{2,ij}$  及各向异性时差  $\Delta t_{2,ij}$ , 即

$$\epsilon = \sum_{i=1}^N [t_{ij} - t_{2,ij}]^2 \quad (3)$$

$$\Delta t_{2,ij} = t_{ij} - t_{2,ij} \quad (4)$$

式中:  $\epsilon$  为误差平方和。图 1a、图 1c 中的红线分别表示在最小平方误差原则下不同深度的拟合结果。经过这种弱各向异性修正后, 除个别点外, 1981m 的时差  $\Delta t_{2,ij}$  在 3500m 井源距内减小到  $\pm 20$ ms (图 1b), 2591m 的  $\Delta t_{2,ij}$  在 4000 井源距内减小到  $\pm 20$ ms (图 1d)。

$\Delta t_{1,ij}$  和  $\Delta t_{2,ij}$  在 1981m 深度的空间分布如图 2a、图 2b 所示, 经过 VTI 介质假设逼近后,  $\Delta t_{1,ij}$  的同心圆现象在  $\Delta t_{2,ij}$  中消失。进一步表明研究区中、浅层地层的地震传播特性更接近弱各向异性 VTI 介质的性质。

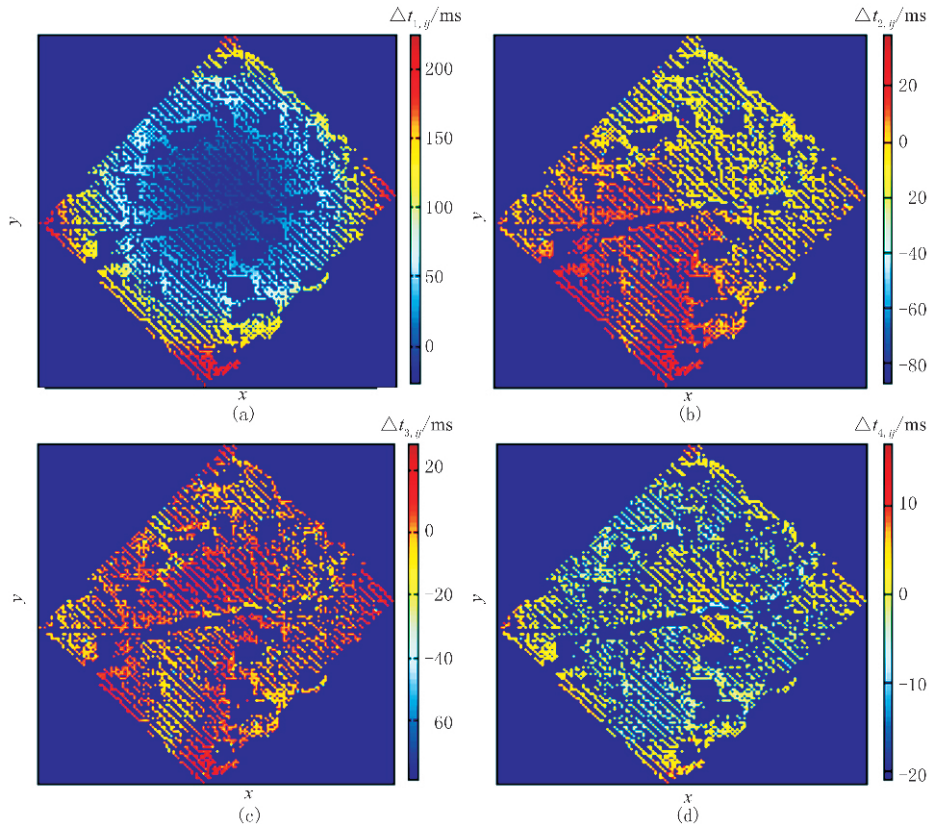


图2 深度为1981m、不同假设条件下的正演旅行时与VSP初至时差的空间分析  
(a)各向同性假设;(b)VTI假设;(c)VTI和HTI假设;(d)VTI、HTI和地表一致性假设

逐点计算每一深度点的时差  $\Delta t_{2,ij}$ ,可以得到不同深度点的弱各向异性参数,其随深度的变化关系如图3所示。

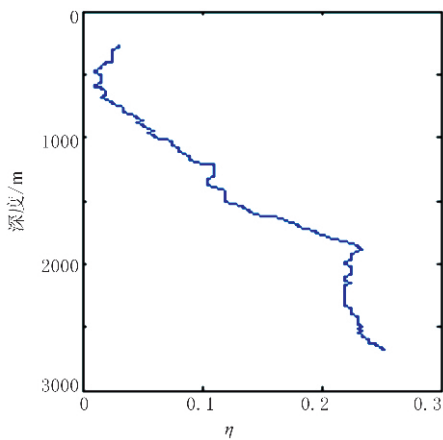


图3 VTI介质各向异性参数随深度变化关系图

### 2.3 HTI假设条件下的时差分析

在VTI介质假设条件下,深度为1000~2000m时,90%的  $\Delta t_{2,ij}$  在  $\pm 20\text{ms}$  内,深度大于2000m时,  $\Delta t_{2,ij}$  也在  $\pm 20\text{ms}$  内。时差随井源距的变化基本消除,  $\pm 20\text{ms}$  的时差仍然无法满足地震成像精度和地

震分辨率的要求,说明 VTI 介质假设与实际地层间仍存在一定的差异。

根据研究区的地质条件,进一步假设剩余时差来自 HTI 介质影响和近地表影响两个因素。图4a、图4c分别为在1981m和2591m深度处时差  $\Delta t_{2,ij}$  随方位角的变化关系,说明了研究区介质具有一定的 HTI 介质(含非均匀介质和构造倾角)特性。

HTI 介质理论认为,HTI 介质中裂缝的强度和方向具有明显的空变特点,如果在 VTI 介质假设基础上分析时差  $\Delta t_{2,ij}$  与方位角之间的关系,获得的 HTI 介质信息中将包含非均匀空间速度场信息和地层倾角信息。虽然此时的 HTI 介质参数不一定具有确切含义,但不同深度的相对 HTI 介质强弱变化和方向信息可以帮助识别裂缝。

本文采用高阶多项式,在最小平方误差原则下拟合时差  $\Delta t_{2,ij}$ ,即

$$\epsilon = \sum_{j=1}^N (\Delta t_{2,ij} - t_{3,j})^2 \quad (5)$$

其中:  $t_{3,ij} = c_k \alpha^k$ ,  $k=0, \dots, 7$ ,  $c_k$  为一系数;  $\alpha$  为方位角。图4a、图4c中的红线为本方法求出的使  $\epsilon$  最小

的  $t_{3,ij}$ , 得到 HTI 假设基础上的时差  $\Delta t_{3,ij}$ , 即

$$\Delta t_{3,ij} = \Delta t_{2,ij} - t_{3,ij}$$

除少数散点外, 时差  $\Delta t_{3,ij}$  基本减小到  $\pm 15\text{ms}$  (图 4b、图 4d)。通过图 4a、图 4c 与图 4b、图 4d 的比较可以看出, 时差由  $\Delta t_{2,ij}$  减小到  $\Delta t_{3,ij}$ , 基本消除了时差随方位角的变化。

### 2.4 地表一致性假设条件下剩余时差分析

假设时差  $\Delta t_{3,ij}$  是近地表引起的时差, 如果满足地表一致性条件, 则在此近地表条件下求得的旅行时  $t_{4,ij}$  及其修正后的近地表剩余时差  $\Delta t_{4,ij}$  可表示为

$$\Delta t_{4,ij} = \Delta t_{3,ij} - t_{4,ij} \quad (6)$$

$$t_{4,ij} = \frac{1}{N-d} \sum_{i=d}^N \Delta t_{3,ij} \quad (7)$$

其中:  $d$  为计算  $t_{4,ij}$  的检波器起始级数;  $N$  为总的检波器级数。图 5 为  $t_{4,ij}$  随方位角和井源距的变化关系, 由图可以看出, 除一些散点外,  $t_{4,ij}$  基本上在  $\pm 10\text{ms}$  范围内变化。图 6 为不同深度点经过近地表时差校正后的时差与方位角的关系图,  $\Delta t_{2,ij}$  和  $\Delta t_{3,ij}$  中的散点经过近地表时差校正后基本消除, 剩余时差为  $\pm 10\text{ms}$ 。

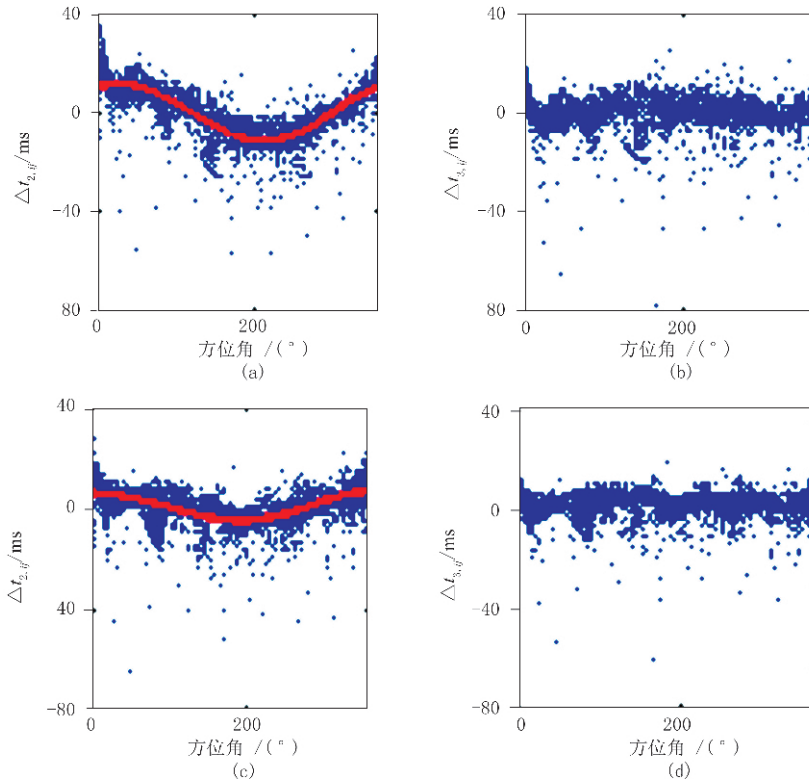


图 4 不同假设条件、不同深度时差随方位角变化关系图

(a) VTI 假设, 1981m; (b) HTI 假设, 1981m; (c) VTI 假设, 2591m; (d) HTI 假设, 2591m

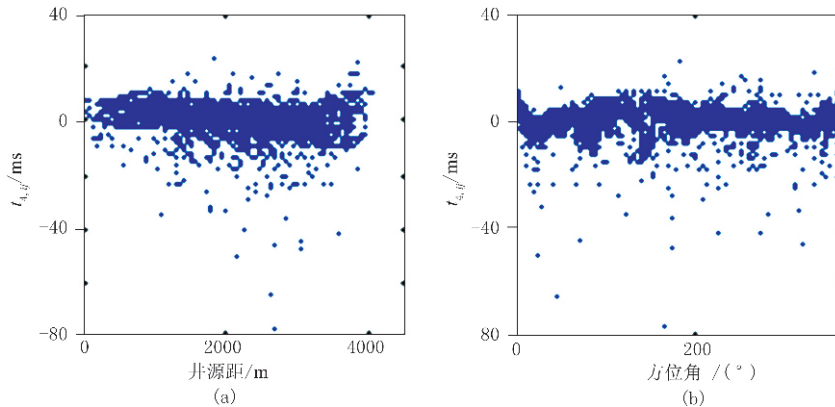


图 5 近地表时差与井源距(a)和方位角(b)关系图

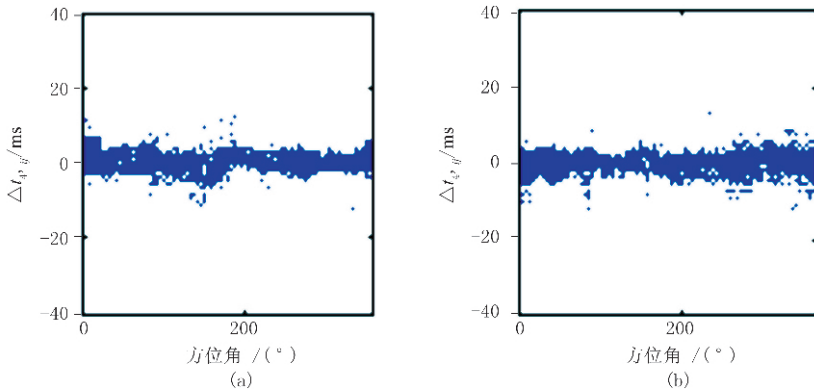


图6 不同深度点的近地表时差校正后剩余时差随方位角变化关系图  
(a)1981m; (b)2591m

### 3 结果分析

通过研究不同介质假设条件下的地震反射波正演旅行时间与 VSP 数据初至时差随井源距和方位角的变化关系,得到一系列研究结果,并对结果进行分析。

(1)由图 2、图 4、图 5、图 6 可见,在深度 1981m 时,从各向同性介质假设的时差  $\Delta t_{1,ij}$  演变到 VTI 介质假设的时差  $\Delta t_{2,ij}$ ,再变化到 HTI 介质假设的时差  $\Delta t_{3,ij}$ ,最终变化到地表一致性假设的时差  $\Delta t_{4,ij}$  的过程中,时差由 100ms 逐步减小到  $\pm 10$ ms,时差随井源距、方位角的变化也逐渐消除。

(2)由图 2b 可以看出,VTI 介质东北方向的时差  $\Delta t_{2,ij}$  比西南方向小,说明研究区内存在空间非均匀速度影响和构造倾角影响。经 HTI 介质假设后引起的时差  $\Delta t_{3,ij}$  数值明显减小。

(3)图 7a、图 7b 分别为深度 2591m 时 VTI 介质和 HTI 介质的时差  $\Delta t_{2,ij}$  和  $\Delta t_{3,ij}$ 。由图可见,深

度 2591m 时的非均匀速度场的空间变化或构造倾角影响明显小于 1981m 时的影响(图 2b),而研究区在两个深度的构造倾角基本相同,因此推测东北~西南方向的剩余时差来自非均匀速度场的影响。

(4)分析图 4a、图 4c 中对 VTI 介质时差  $\Delta t_{2,ij}$  的拟合结果可知,深度 1981m 处的时差  $\Delta t_{2,ij}$  大于 2591m 的时差,说明深度 1981m 处的断裂或裂缝强度大于深度点 2591m 处的强度。

(5)图 8 为地面地震数据在不同深度点的相干属性切片。由图可见,1981m 深度点受到近南北向断裂的影响明显,2591m 深度点断裂影响相对减弱,与三维 VSP 计算时差  $\Delta t_{2,ij}$  (图 4a、图 4c) 和  $\Delta t_{3,ij}$  (图 4b、图 4d) 的结果相同。

(5)图 9 为观测井位置地面地震的共炮检距道集随方位角变化的情况。由图可见,深度 1981m 处的裂缝明显随方位角变化,在相同速度假设条件下,图 9 中深度最小的  $90^\circ$  和  $270^\circ$  (南北) 方向应为裂缝方向,同理 2591m 处裂缝方向与 1981m 处相同,但裂缝影响远小于 1981m 处。

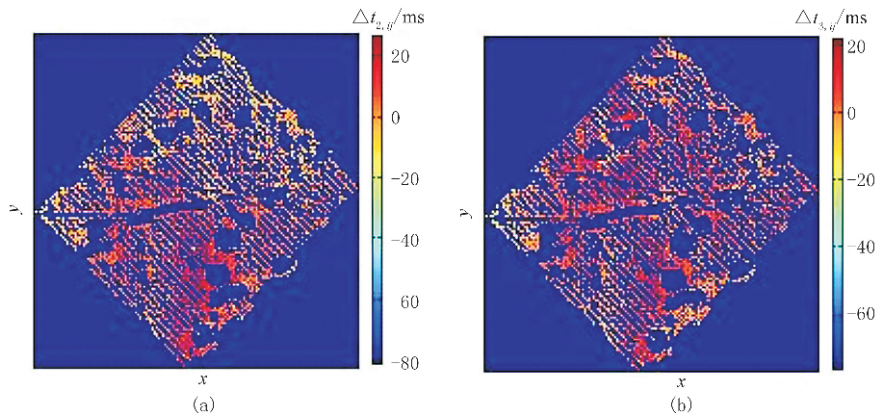
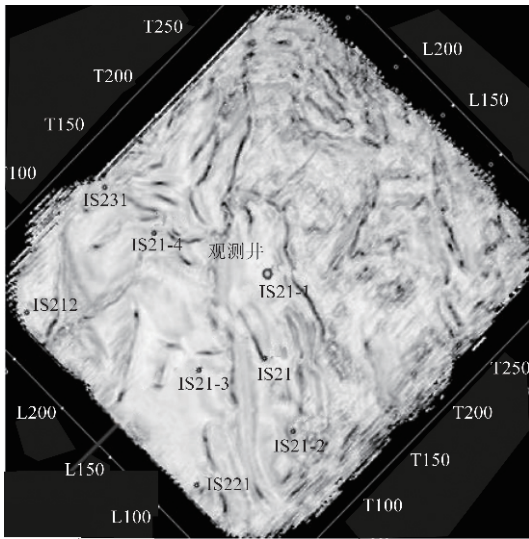
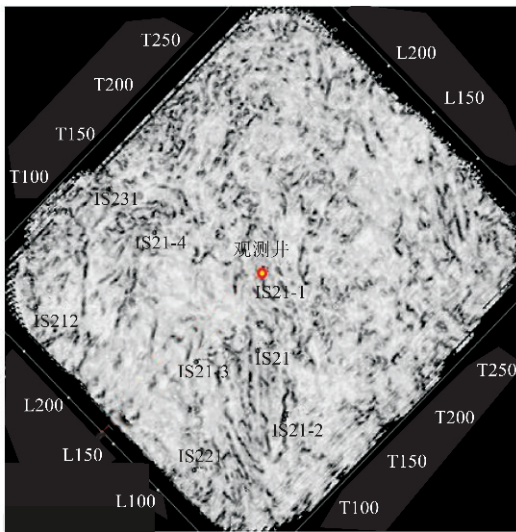


图7 2591m 深度时不同介质的时差  
(a)VTI 介质; (b)HTI 介质



(a)



(b)

图 8 地面地震数据在不同深度的相干属性切片  
(a)1981m; (b)2591m

## 4 结论

本文在 VTI 介质假设、HTI 介质假设以及地表一致性假设基础上,利用 3D VSP 和全方位地面地震数据,分析了研究区反射波走时特点,给出了求解 VTI 各向异性参数  $\eta$  和 HTI 介质的空间相对变化的方法,通过实际资料的处理得出了以下结论:

(1)依据水平层状各向同性介质假设条件不能描述研究区中浅层介质地震波的传播特性;

(2)在利用 VTI 介质、HTI 介质假设前提下,再进行地表一致性时差校正,即可正确描述文中目标区在  $T_4$  (3200m)以上地层地震波的传播特性;

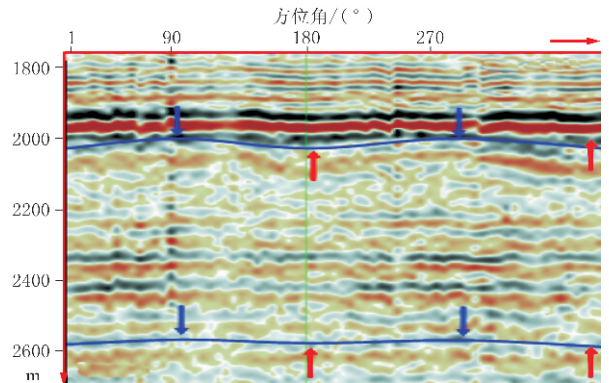


图 9 观测井位置相应深度的共炮检距道集

(3)在最小平方误差前提下,利用扫描方法可求出使 VSP 数据初至时与各向异性时差最小的各向异性参数  $\eta$  (在 VTI 介质中,各向异性参数  $\eta$  随深度增大而增大);

(4)采用高阶多项式,在最小平方误差原则下拟合时差  $\Delta t_{2,ij}$ ,可求出 HTI 介质假设前提下的时差  $\Delta t_{3,ij}$ ,该时差可消除非均匀介质速度场或构造倾角的影响;

(5)HTI 介质空间相对变化与实际裂缝空变具有一定的一致性,可利用不同深度的相对 HTI 介质强、弱变化和方向信息识别裂缝。

## 参考文献

- [1] Helbig K and Thomsen L. 75-plus years of anisotropy in exploration and reservoir seismics; A historical review of concepts and methods. *Geophysics*, 2005, 70(6): 9~23
- [2] Berryman J G. Long-wave elastic anisotropy in transversely isotropic media. *Geophysics*, 1979, 44(5): 896~917
- [3] Crampin S. Shear-wave polarizations; A plea for three-component recording. *Expanded Abstracts of 53rd SEG Mtg*, 1983, 425~428
- [4] Helbig K. Elliptical anisotropy-its significance and meaning. *Geophysics*, 1983, 48(7): 825~832
- [5] Helbig K. Anisotropy and dispersion in periodically layered media. *Geophysics*, 1984, 49(4): 364~373
- [6] Tsvankin I and Thomsen L. Nonhyperbolic reflection moveout in anisotropic media. *Geophysics*, 1994, 59(8): 1290~1304
- [7] Alkhalifah T and Tsvankin I. Velocity analysis for transversely isotropic media. *Geophysics*, 1995, 60(5): 1550~1566
- [8] Schoenberg M and Sayers C M. Seismic anisotropy of fractured rock. *Geophysics*, 1995, 60(1): 204~211
- [9] Bakulin A V et al. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data-Part I: HTI model due to a single fracture set. *Geophysics*, 2000, 65(6): 1788~1802

(本文编辑:金文昱)