

文章编号: 0253-9985(2007)01-0100-06

断裂系统解释与储层预测中的三维相干技术

余德平^{1,2}, 曹 辉², 郭全仕²

(1. 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098)

2. 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: 三维相干技术是根据三维地震数据体中相邻地震道之间地震信号的相似性来判断地层、岩性的横向非均匀性, 它具有下列特点: 1) 从工区构造体系特征出发, 自动检测断裂系统, 避免了常规构造解释对解释人员经验的依赖性, 使得解释结果更客观、真实; 2) 相干道数、时窗大小以及时延参数的选择对三维相干技术的处理效果起着至关重要的作用; 3) 应用三维相干技术不仅可以自动检测断裂系统, 而且可以描述储层的横向非均匀性, 确定特殊地质异常体的边界, 如: 岩溶地貌特征、河道砂、砂坝等; 4) 充分发挥了计算机运算速度快的特点, 提高了解释效率, 缩短了勘探周期。

关键词: 参数选择; 三维相干技术; 岩溶; 断裂系统解释; 储层预测

中图分类号: TE112.2 **文献标识码:** A

3D coherence technique in fault system interpretation and reservoir prediction

She Deping^{1,2}, Cao Hui², Guo Quanshi²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098 China; 2. Nanjing Institute of Geophysical Prospecting, Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Nanjing, Jiangsu 210014 China)

Abstract 3D coherence technique can be used to determine the horizontal heterogeneity of strata and lithology by capturing the signal coherency of adjacent seismic channels among the data volume of 3D seismics. The technique has the following features: it is based on tectonic characteristics of acquisition areas and can automatically detect the fault systems, thus yielding more objective interpretations by avoiding the dependence on workers' experiences of conventional structural interpretation; ④ numbers of coherent track, size of time window, and selection of delay parameters are of vital importance for the interpretation quality of the technique; ④ it can be used in the description of horizontal heterogeneity of reservoirs and determination of the boundary of special geologic anomalous bodies such as karst topography, channel sand, sand bank, and etc.; by utilizing the rapid processing speed of computers, it enhances the interpretation efficiency and reduces the exploration cycle.

Key words parameter selection; 3D coherence technique; karst; fault system interpretation; reservoir prediction

三维相干技术是近年来发展起来的一项三维地震快速解释技术。它利用三维地震偏移数据体中相邻道之间地震信号的相似性, 描述地层和岩性的横向非均匀性。这种描述是由计算机自动完成的, 因此运算速度快。将三维相干技术与三维

可视化技术相结合, 不仅能够从宏观上认识整个工区的断层空间展布以及地层岩性的空间变化规律, 有助于解释人员快速了解沉积构造演化等方面的地质特征, 从而达到提高解释速度, 缩短勘探周期之目的, 也避免了常规构造解释结果受解释

人员经验制约的缺陷。对断层及其附近的细节特征, 如断距的变化、断层的扭曲程度、岩层的破碎程度等都能反映。而且能够解释储层横向非均匀性, 如碳酸盐岩溶蚀性储层岩溶发育带的空间展布, 碎屑岩中砂体(河道砂、砂坝等)的空间展布规律及其储集性能, 提高了解释精度^[1, 2]。

相干技术应用于地震资料的处理和解释已经有 30 多年了, 但该技术早期只用于资料解释中的层位自动追踪和滤波处理, 且往往作为一种数值算法包含在其他技术之中。Bahorich 和 Famer 等最早将地震相干性(或更重要的是欠相干性)作为一种独立的地震属性技术展示出来^[3], 立即引起巨大反响。经过了近 10 年的发展, 现在三维相干技术已经成为油气勘探地震资料解释, 特别是全三维解释中必备的技术。

1 算法概述

三维相干技术的出现尽管只有短短的 10 年时间, 但其发展已经历 4 代, 即第一代基于相关的算法、第二代基于相似性的算法、第三代基于本征值的算法和第四代的子体相干技术等。

1.1 第一代相干算法——互相关法(C 1)

设离散地震信号序列, 则相邻道之间地震信号的互相关系数为:

$$R_{in}(m) = \frac{\sum_{j=1}^K [X(i, j) \cdot X(n, j-m)]}{\sqrt{\sum_{j=1}^K X^2(i, j) + \sum_{j=1}^K X^2(n, j-m)}} \quad (1)$$

则其相干值定义为:

$$\rho_{in} = 1 - \max_m R_{in}(m) \quad (2)$$

式中: i 和 n 是进行相干计算的地震道道号; j 是时窗内样点序号; $X(i, j)$ 是地震记录信号; $R_{in}(m)$ 是所选时窗内第 i 道与第 n 道地震信号之间的互相关系数; ρ_{in} 是相干值; m 是相邻道时窗的延迟时间, 它反映的是该地层该测线方向的视倾角^[4, 5]。

利用方程 (1) 和 (2) 分别沿纵测线方向和横测线方向求取相干值, 然后相加即得到中心道关于中心时间点的相干值。

分析 C 1 可以看出, 由于进行相干计算的地

震道很少, 该方法尽管运算速度很快, 但抗噪能力弱, 为此最早对其进行的改进是采用沿纵、横测线方向分别选择多道计算, 然后根据各道离中心道的距离加权相加。这样尽管影响了运算速度, 也降低了分辨率, 但抗噪能力却得到了明显的提高。

1.2 第二代相干算法——相似系数法(C 2)

C 1 采用增加计算道数的方法来提高抗噪能力, 但由于只是沿着纵、横测线方向选择, 过多的道数将导致对地质异常分辨率的降低, 为此 C 2 相关道的选择不再只是沿着纵、横测线方向, 而是沿纵、横测线方向若干道内的一个特殊区域, 且以多道相似性算法为基础, 此时中心道与任一相关道的相似系数为:

$$R_{in}(m) = \frac{\sum_{i=1}^N \{ [\sum_{j=1}^J X(i, j-m)]^2 + [\sum_{j=1}^J X^H(i, j-m)]^2 \}}{J \sum_{i=1}^N [\sum_{j=1}^J X^2(i, j-m) + \sum_{j=1}^J (X^H)^2(i, j-m)]} \quad (3)$$

式中: $X^H(k, j)$ 是第 k 道地震道在选定的时窗内第 j 个值 $X(k, j)$ 的正交变换; N 是计算相干的地震道道数; J 是滑动时窗长度; R_c 是互相关系数。利用 $X^H(k, j)$ 可以缩短时窗长度, 提高纵向分辨率和运算速度。

再利用 (2) 式就可以得到多道相似系数法中中心道与任意相关道之间的相干值, 然后将中心道与各个相关道的相干值相加即得中心道关于中心时间点的相干值。

在方程 (2) 中所求得的 m 表示沿中心道与相关道之间地层的视倾角, 由不同方向的 m 就可以拟合出地层视倾角和方位角, 由此得到地层倾角/方位角属性。将倾角和方位角叠合在一起, 结合三维相干数据体, 不仅可以确定断层的空间展布、断层附近的细节特征及其构造应力场, 而且可以研究地下地貌特征, 结合其他方法可以恢复古构造沉积史, 进而可以从构造沉积演化史上描述目标储层中有利储集带的空间分布规律。

1.3 第三代相干算法——本征值法(C 3)

在三维地震数据体中, 由相邻的 I 道, 每道 J 个样点的数据子体构成矩阵为:

$$D = [x_{i-j-m}]_{I \times J} \quad (4)$$

式中: D 是地震数据子体矩阵; I 是计算相干值时的地震道数, 每一列代表第 I 道地震数据的 J 个样点值, 每一行代表中每一道同一时间样点的值。

则 D 的协方差矩阵为:

$$C_{J \times J} = D_{J \times N}^T D_{J \times N} \quad (5)$$

式中, 上标 T 表示矩阵转置。

方程 (5) 中协方差矩阵 C 的本征值的数目及大小表示数据子体中有多少个自由度, 因此最大本征值在本征值整体中所占有的份额就是该子体中的相似性, 即

$$R_c = \frac{\max(\lambda_i)}{\sum_i \lambda_i} \quad (6)$$

式中: R_c 表示互相关系数; λ_i 是矩阵的第 i 个本征值。

C 3 的最大优点是抗噪能力和分辨率更高。但仔细分析方程 (4) 可以看到, m 是由地层倾角所产生的道间延迟时间, 要消除地层倾角的影响, 必须在确定最大值的情况下, 每一道都要对 m 要进行扫描, 因此计算量特别大。实际上早期的 C 3 产品 (即 C 3.1) 并没有完全解决这个问题, 处理倾斜地层的效果并不理想, 为此出现了多种改进型 C 3 算法, 其中最典型的的就是采用 C 1 的方法, 首先求出各道之间的倾角和方位角值, 并拟合成一个光滑的 m 曲面, 由此构建地震子体矩阵 D 。这种方法明显提高了 C 3 法的精度^[6-7], 也大大提高了计算效率。

1.4 第四代相干算法——子体相干技术 (C 4)

第四代相干算法是由德国 TEEC 公司推出了专利技术——地震子体属性 (Seismic Volume Attributes, SVA)^[8]。它以三维地震资料 (地震数据

或其他属性数据) 中任意尺寸的子体为基本计算单元, 采取多算子的方法求取子体与其他子体之间的地震相干属性, 其在对三维数据体进行不连续性分析时, 可提高数据体的空间视分辨率, 突出复杂地质异常体的细节部分, 有利于地学研究人员对所研究的小断层、裂缝发育带和储层非均质性等复杂地质现象进行识别和解释。

近几年来, 频率域和深度域的相干算法是三维相干技术方法研究的一个热点, 在频率域可以利用 Fourier 变换的高速度, 将求相干值的问题转化为求熵的问题; 随着叠前深度偏移技术的广泛应用, 深度域地震数据大量涌现, 在深度域进行资料解释, 可以直接利用分辨率高的测井资料, 但如何直接计算三维相干数据体还有待于进一步研究。

2 参数选择

2.1 相干道数

分析相干算法, 可以看出, 相干道数在相干值计算中具有极为重要的意义, 道数过少, 局部噪音的存在将导致假异常的出现; 增加道数能够压制噪音, 但造成对小的地质异常体的抑制, 同时也弱化了地质异常体的边界, 降低了信号的分辨率, 同时增加了运算量。因此在确定相干道数时, 要根据地震数据体的信噪比及主要目标异常体的信号异常强度而决定^[9-11], 一般在纵横测线方向分别选择 3 道, 但在一些特殊地区也有选择 9 道或 11 道。

图 1 是松辽盆地孤家子工区不同相干半径、C 1 算法的等时切片。从图中可以看出, 从工区左

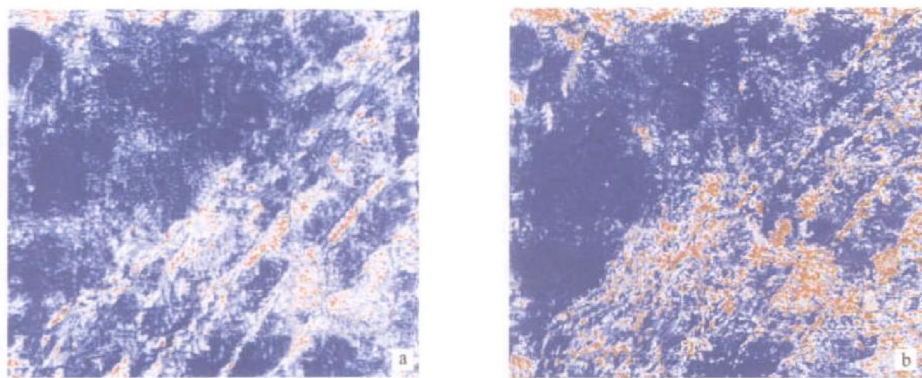


图 1 松辽盆地孤家子工区不同相干道数沿层相干切片对比图

Fig. 1 Correlation of horizontal coherent slices of different track numbers in Gujiazi acquisition area, Songliao Basin

a. 7 道相干沿层切片; b. 3 道相干沿层切片

下角至右上角有若干条呈线状平行分布的异常带,在不同的相干道数的情况下,该异常线条粗细差异很大。大相干半径(7道)只能粗略看出边界不甚清晰的断层的整体展布,而小半径(3道)却能看出各断裂带的细节特征。

2.2 相干时窗大小

不同的相干算法对时窗大小的选择标准是不一样的,以 C1 为例,时窗长度一般为地震信号主频的 $2/3 \sim 3/2$ 周期。最小不能小于半周期长度,时窗过小,视野窄,看不到一个完整的波峰或波谷,据此所计算的数据异常反映噪音的几率比反映小断层的几率大;当计算时窗过大时,由于由小断层和薄储层的岩性非均匀性渐变所引起的反射信号的异常讥笑,相干计算结果中将极难反映。尽管 C4 算法可以缩短时窗长度,但也不能太短。具体选择时要根据地震数据质量及研究目标的大小和引起的异常程度来确定。

2.3 时窗延迟时间

在方程(1)和(3)中, m 表示中心道与互相关道时窗之间的延迟时间,方程(4)在构建子数据体矩阵时,相邻道矩阵列数据也存在该参数。这是一个通过扫描而得到的值。它反映的是地层视倾角所引起的同相轴时间差。因此确定扫描范围 m 极为重要,过大会增加计算量,过小得不到有效值,一般选择为所计算的相干道内由地层倾角所产生的最大时差(由工区实际资料确定)。

3 应 用

3.1 断层系统解释

断层在地震数据体中能够造成相邻道之间信号的强烈非均匀性,三维相干技术对其极为敏感。用三维相干数据体进行断裂系统解释不需要象常规构造解释那样从逐条剖面开始,而是利用全三维解释技术首先对地震数据体、相干数据体和倾角/方位角属性数据体进行浏览,从工区总体构造体系上分析断裂系统的空间分部规律,然后利用自动追踪技术对各个断层进行自动解释。这种解释方式由计算机自动进行,不需要人工过多干预,避免了解释结果对解释经验的依赖性,还可检测许多常规解释难以发现的特殊断层,提高了解释的速度和精度。

图2是新疆雅克拉地区雅东工区三维相干切片与常规构造解释结果对比,首先从等时相干切片和倾角/方位角属性图可以看出,工区存在约20条左右从左向右展布的断层,其中尤以F2和轮台断裂为主,F2是正断层,轮台断裂为逆断层,以这两个断裂为界将工区分为三部分,中间为上升盘,两端为下降盘,下降盘中地层整体相干性较好,说明地层沉积稳定;而上升盘整体为深灰色(或黑色)的相干性较差区块,说明地层破碎比较严重。结合工区沉积构造演化特征,下降盘为中生界沉积的稳定区块,而上升盘则是古生界碳酸盐岩

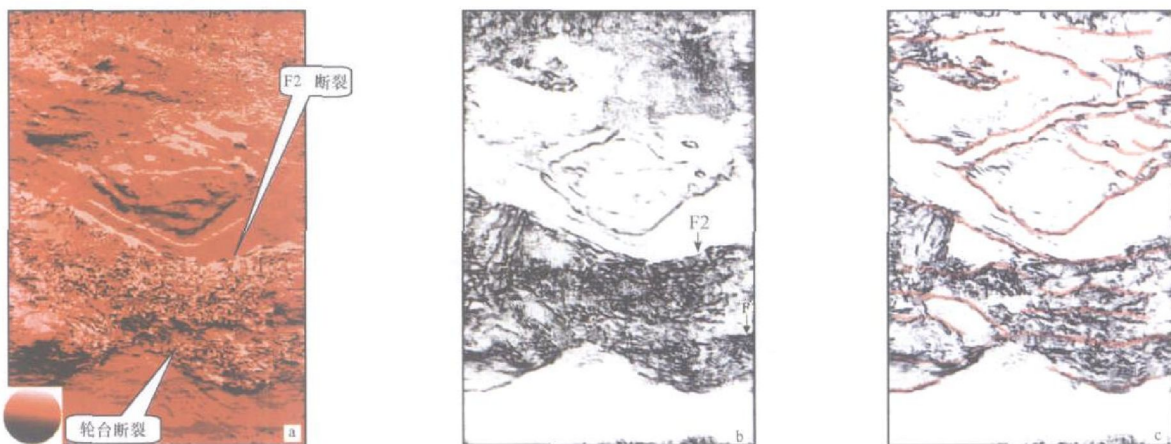


图 2 雅东三维沿层相干切片与常规构造解释断层分布对比

Fig. 2 Correlation of fault distribution gained through horizontal coherent slices and conventional structure interpretation

a. 倾角/方位角属性等时切片 ($t=3250$ ms); b. 相干等时切片 ($t=3250$ ms); c. 沿 T33 层位面

地层因受 F 2和轮胎断裂的挤压作用而破碎,另外从挤压的应力场特征可以看出,在该地块受挤压的过程中, F 2应该是一个逆断层,由此可以推论 F 2断层经历了由逆到正的转换过程。图 2c是常规构造解释所得到的沿 T33层位面的断裂系统(图中橘黄色线条)叠合在沿该层位面的相干切片上,可以看出,常规构造解释的断裂系统与相干处理结果完全一致。

3.2 碳酸盐岩储层预测

塔河油田下奥陶统碳酸盐岩储层是一个典型的岩溶储层,岩溶的发育程度决定了储集性能的优逆,而岩溶的发育程度与岩溶产生时期受地形、地貌控制水系的分布具有密切的关系,特别是地表水和近地表水,因此研究岩溶地区古地形地貌特征对于研究该区岩溶分布特征具有重要意义。

岩溶发育地区,由于受岩溶构造单元的影响,地层的波阻抗将明显降低,地层的横向非均匀性将增强,极易产生杂乱反射,从而导致相邻道之间地震数据相干性变差。根据上述特征,我们利用倾角 /方位角属性技术研究对岩溶发育起控制作用的古岩溶地貌特征,用三维相干技术研究下奥陶统碳酸盐岩顶面反射波的杂乱程度。图 3是该区的三维相干切片,由图 3a的倾角 /方位角属性切片可以明显看出本区从右上角向左下角方向呈鼻状隆起,而在隆起的两侧有一系列的小沟槽,很显然这种小沟槽是古水系的主要通道,其两侧及沟谷是古岩溶的主要发育带,但不同位置的岩溶发育程度和保存效果是极不相同的,处于水源最充分的沟谷尽管是岩溶最发育带(相干图中深黑色区域),也是二次沉积物源最丰富的地区,而山脊则因为缺乏流水的作用而处于岩溶不发育带,因此

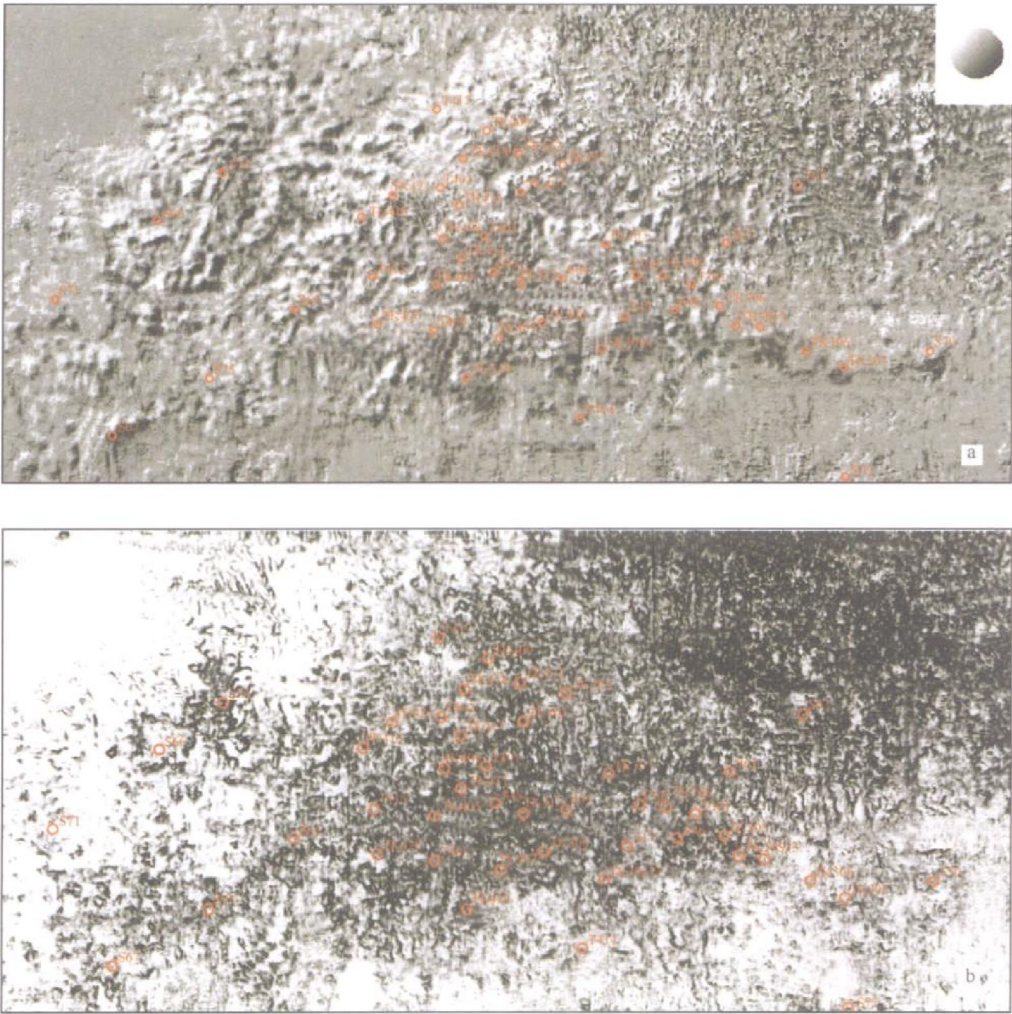


图 3 塔河油田某区块三维相干等时 (3 250 m s)切片
Fig. 3 3D coherent equitine slices (3 250 m s) of a block in Tahe oilfield
a. 倾角 /方位角属性; b. 相干属性

最有利的储集空间分布在沟谷与山脊之间的过渡带上, 这里岩溶的发育较高, 且保存完好, 结合图 3b 的沿层相干切片可以确定本区最有利的油气储集带。

3.3 碎屑岩储层横向非均匀性分析

利用三位相干技术研究碎屑岩储层, 不仅能够分析储层的横向非均匀性变化, 而且可以圈出一些特殊砂体的边界。图 4 是松辽盆地南部某工区沿层相干切片, 从该图中不仅可以明显看出断层的平面分布, 而且可以看到在工区左上角的一异常区块 (图中红线区域), 该区块的相干性处于稳定地层与断裂系统之间, 结合区域构造沉积研究结果可以将其解释为砂坝, 是一个极为有利的油气储集区块。另外图 2 中箭头所指的两条平行异常线, 有些解释人员解释为平行断层, 也有人认为可能是一个河道砂, 因为在图 5 所示的振幅属性和地震剖面中, 这是一个强反射带。如果这是一个河道砂, 那么在图 2 中解释的两条近似平行的断层就应该是该河道砂的边界。

4 结束语

三维相干技术作为一种独立的地震属性出现只有短短的 10 年时间, 但其在断裂系统解释和储层预测中所具有的快速、高效、高精度和受人为因素影响小等特点, 使其成为现代三维地震资料解

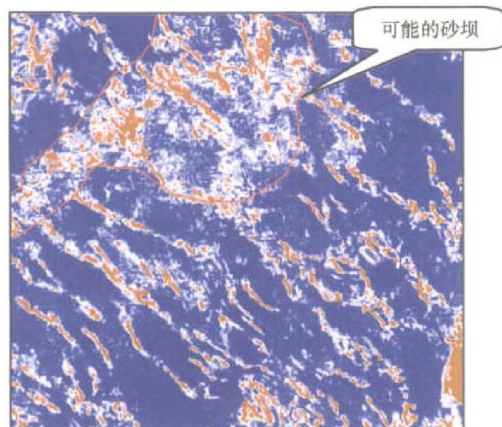


图 4 沿层相干切片中砂坝示意图

Fig. 4 Sand bank in a horizontal coherent slice

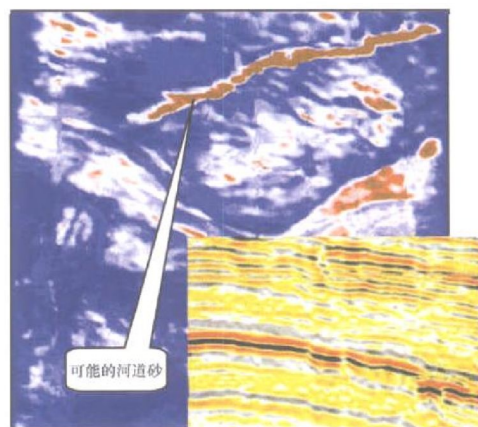


图 5 振幅切片和地震剖面中的河道砂

Fig. 5 Channel sand in an amplitude slice and a seismic section

释, 特别是全三维地震资料解释的常规技术, 也将是必备技术。

参 考 文 献

- 1 余德平, 曹辉, 郭全仕. 应用三维相干技术进行精细解释 [J]. 石油物探, 2000, 39(2): 83~88
- 2 余德平, 曹辉, 王咸彬. 相干体技术及其在地震解释中的应用 [J]. 石油物探, 1998, 37(4): 75~79
- 3 Marfurt K J, Kirin R, Farmer S L, et al. 3D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm [J]. Geophysics, 1998, 63(4): 1150~1165
- 4 朱成宏, 黄国骞, 秦瞳. 断裂系统精细分析技术 [J]. 石油物探, 2002, 41(1): 42~48
- 5 Gerztenkom A, Marfurt K J. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping [J]. Geophysics, 1999, 64(5): 1468~1479
- 6 Chopra S, Pichford S. Integrating coherence cube imaging and seismic inversion [J]. The Leading Edge, 2001, 20(4): 354~362
- 7 张军华, 王永刚, 赵勇, 等. 相干体技术算法改进及其在 T.H 地区的应用 [J]. 物探与化探, 2002, 26(1): 50~52
- 8 Trappe H, Hallich G, Foell M. Potential power in the application of seismic volume attributes [J]. First Break, 2000, 18(9): 397~402
- 9 孙义梅, 杨春峰, 陈程, 等. 相干技术的参数选取及其效果分析 [J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(5): 640~645
- 10 郑冰, 承秋泉, 高仁祥. 塔里木盆地东北部奥陶-志留系沉积成岩作用 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 85~92
- 11 于建国, 姜秀清. 地震属性优化在储层预测中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 291~295

(编辑 高 岩)