

断层识别技术及其在 MB 油气田的应用

刘彦¹, 孟小红¹, 胡金民², 吴江南³

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 南化红山膨润土(辽宁)有限公司, 北京 100027;
3. 阿派斯油藏技术有限公司, 北京 100016)

摘要 结合 MB 凸起油气勘查项目, 总结断层解释方法: 既要依据地震时间剖面特征来分析判断, 更要了解盆地范围内应力场、变形机理以及工区范围内的构造样式. 针对微小断层识别困难这一问题, 采取多种技术手段, 包括: (1) 叠后目标处理提高地震资料对小断层的分辨能力; (2) 正演模型分析指导小断层的解释; (3) 相干数据体水平切片和近反射道几何特征分析识别微小断层; (4) 三维数据体任意线剖面检验微小断层, 识别了常规地震剖面难以确定的小断层, 达到了断层精细解释的目的.

关键词 断层, 相干性, 正演模型, 构造解释

中图分类号 P631 **文献标识码** A **文章编号** 1004-2903(2008)02-0515-07

Faults identifying technique and it's application in MB oil-gas field

LIU Yan¹, MENG Xiao-hong¹, HU Jin-min², WU Jiang-nan³

(1. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Sud-Chemie Redhill Bentonite (Liaoning) Company, LTD., Beijing 100027, China;
3. APEX Reservoir Service, LNC., Beijing 100016, China)

Abstract Based on oil-gas exploration project in MB uplift, it is concluded that identifying faults considers not only faults performance in the seismic horizontal time profile, but also stress field of the basin, strain mechanism and structural style of the project. In order to identifying little faults of the project, author makes use of multi-methods including poststack target process, forward model analysis, horizontal time slice of coherence cube, near-reflect-trace geometry character and arbitray line of 3-D data cube profile analysis, finds more little faults and fulfills the detail faults interpretation.

Keywords faults, coherence, forward model, structural interpretation

0 引言

断层是指岩层或岩体顺破裂面发生位移这样一种地质现象^[1]. 在油田勘探中, 断层解释是整个构造解释的关键, 断层解释的精确性和合理性直接影响着构造成果的精度. 有关断层解释的方法很多, 前人也有不少总结. 一般情况下, 较大的断层可以通过盆地范围内应力场分析, 变形机理分析以及了解工区范围内的构造样式, 依据地震时间剖面特征进行解释. 断层在地震时间剖面上往往表现为: 反射波同相轴错断; 标准反射同相轴发生分叉、合并、扭曲、强相

位转换; 反射同相轴突然增减或消失, 波组间隔突然变化; 反射同相轴产状突变, 反射零乱或出现空白带; 特殊波的出现等^[2,3], 可根据这些特征来判别解释断层. 但是受地震资料分辨率的影响, 对于微小断层, 采用上述方法解释起来非常困难. 这里结合 MB 凸起油气勘查项目利用现代新技术对断层(尤其是 5~10 m 的小断层)的解释进行讨论.

1 区域构造概况

MB 凸起属中央坳陷中次一级的鼻状凸起, 介于陆梁隆起含油气区带与莫索湾凸起含油气区带之

收稿日期 2007-10-10; **修回日期** 2008-01-20.

基金项目 国家"863"课题(2006AA06Z111)资助.

作者简介 刘彦, 女, 1975 年生, 陕西省安康市人, 现为中国地质大学(北京)在读博士研究生, 专业为固体地球物理学, 主要从事地震资料解释, 储层描述和预测等工作. (E-mail: liuyan2222@126.com)

间,东西夹于东道海子与盆1井西两生烃凹陷之间,区域构造位置非常有利.

MB凸起形成于石炭纪末期到二叠纪海西运动期.印支运动使内陆拗陷沉积盆地发育进入全盛时期,致使海西晚期形成的大量逆断层停止了明显活动.从早侏罗世到中侏罗世初期,MB凸起处于相对稳定状态,局部发育微构造.中侏罗世燕山运动第一幕,在早期逆断层附近形成一系列与之大致平行走向的张扭性正断层;隆起的高部位西山窑组遭受剥蚀.侏罗纪末燕山二幕运动,盆地开始进入挤压收缩阶段,盆地基底整体向南掀斜,这种构造格局基本延续至今.第三系至今的沉积是在喜山运动的背景下进行的,沉积中心已明显南移,盆地收缩和向南掀斜更为明显.

2 多项技术综合识别断层

研究区存在的主要问题在于:受地震资料分辨率的影响,小断层的解释和识别比较困难.为此,利用叠后目标处理、正演模型分析、相干数据体水平切片、近反射道几何特征分析以及解释系统中的三维数据体任意线剖面等多种技术手段来推断断点位置和断层的展布方向,实现断层的主测线、联络线和平面的三维空间闭合解释,确保断裂系统组合的合理性^[4~18].

为了提高地震资料对小断层的分辨能力,采取

叠后目标处理,突出相邻道的不连续性和地震相位的差异变化,便于在剖面上识别和解释小断层.叠后目标处理包括反褶积、谱平衡、振幅比例、滤波、道混波和相干滤波等,有关文献很多^[19].可根据实际需要选择合适的处理模块和相应的处理流程及参数来进行目标处理,这里不多赘述.限于篇幅,本文重点讨论正演模型分析技术、相干体分析技术和近反射道几何特征分析技术.

2.1 正演模型分析技术

假设地质条件是理想情况,正演模型分析可以从理论上指导构造解释和储层预测.本区由于构造运动的作用,发育了众多小断裂,受地震资料分辨率的限制,小断层很难明显被识别出来,需要在理论模式指导下,结合时域放大等功能来综合解释这些小断裂.当子波频率一定时,断距越大,越易识别;当断层断距一定时,子波频率越大,断层分辨率越高.因此依次设计了10 m、20 m、30 m、40 m、50 m不同断距的断层地质模型,结合实际钻井,给出相应的地层速度;根据该区实际地震资料频谱分析,得出该区地震资料主频为30 Hz左右.利用射线追踪法进行正演模型分析研究,验证在理论条件下地震可分辨的断层断距大小(图1),指导构造解释工作.从图中可看出10 m左右的断距地震反射同相轴有一定的错断;而断距大于20 m以上的断层地震反射同相轴明显断开,易于识别和解释.

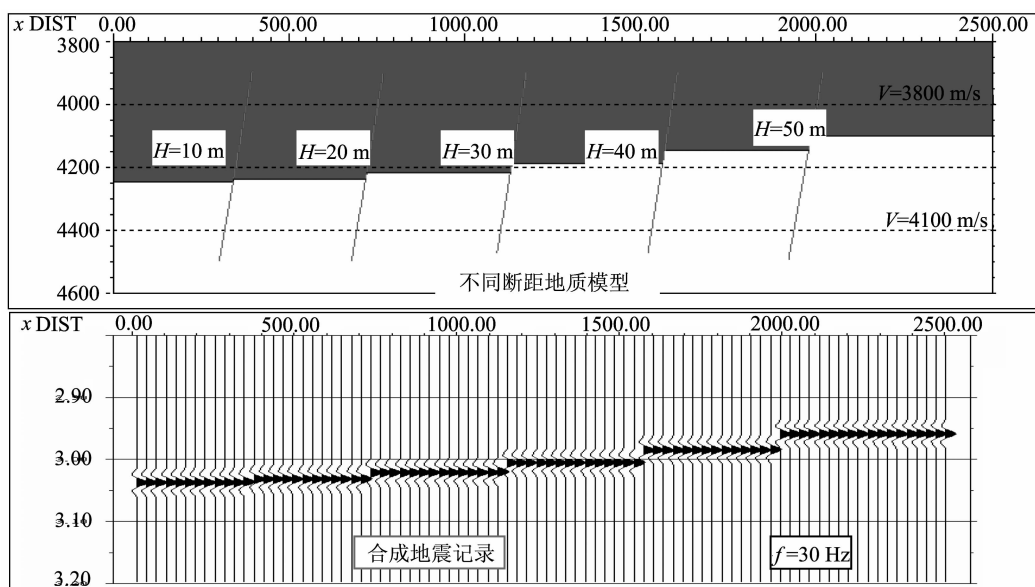


图1 正演模型分析图

Fig. 1 Forward modeling analysis map

2.2 相干数据体分析技术

相干性是相似性的一种数学度量,当应用于地震数据时,相干性指出了两个或多个窗口地震道之间的连续性.相干体分析技术是依据所给地震数据体的道数、倾角大小和计算选择的时窗大小来计算出相关系数,通过量化处理地震相干属性,生成可解释的断层和隐蔽地下构造的图像,突出那些不相干的地震数据,用来解释断层、裂缝、岩性异常体等地质现象^[20~22].相干体分析技术自 20 世纪 90 年代中期发展起来,其算法已由第 1 代基于互相关的 C1 相干算法^[23],第 2 代利用多道相似性的 C2 相干算法^[24],发展到第 3 代基于特征结构的 C3 相干算法^[25].第 3 代相干算法的输入是一个 3-D 地震数据体,输出相应的 3-D 相干数据体结果.假设此 3-D 立方体是 3-D 正立方体,包含 J 道(如主测线 3 道乘以联络测线 3 道,总数是 9 道)和 N 个样点.对这组地震道的每个振幅通过样点序号 n 和道序号 j 进行排序,生成数据矩阵 D :

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1J} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2J} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & \cdots & d_{NJ} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

矩阵 D 第 n 行是:

$$d_n^T = [d_{n1} \quad d_{n2} \quad \cdots \quad d_{nJ}], \quad (2)$$

它表示立方体内每道第 n 个样点值.假如时窗内每个地震道(每个窗口道)都有一个零均值,则对样点 n 而言,样点的协方差矩阵由外积形成:

$$d_n d_n^T = \begin{bmatrix} d_{n1} \\ d_{n2} \\ \vdots \\ d_{nJ} \end{bmatrix} [d_{n1} \quad d_{n2} \quad \cdots \quad d_{nJ}] \\ = \begin{bmatrix} d_{n1}^2 & d_{n1}d_{n2} & \cdots & d_{n1}d_{nJ} \\ d_{n1}d_{n2} & d_{n2}^2 & \cdots & d_{n2}d_{nJ} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n1}d_{nJ} & d_{n2}d_{nJ} & \cdots & d_{nJ}^2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

若矢量 d_n 是一非零矢量,则由等式(3)表示的每个样点的协方差矩阵是一个对称的、半正定的秩 1 矩阵,仅有一个非零、正的本征值.相比之下,整个数据的协方差矩阵 $D^T D$ 是 N 个秩 1 矩阵(来自 N 个时间样点)之和:

$$C = D^T D = \sum_{n=1}^N d_n d_n^T \\ = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N d_{n1}^2 & \sum_{n=1}^N d_{n1}d_{n2} & \cdots & \sum_{n=1}^N d_{n1}d_{nJ} \\ \sum_{n=1}^N d_{n1}d_{n2} & \sum_{n=1}^N d_{n2}^2 & \cdots & \sum_{n=1}^N d_{n2}d_{nJ} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{n=1}^N d_{n1}d_{nJ} & \sum_{n=1}^N d_{n2}d_{nJ} & \cdots & \sum_{n=1}^N d_{nJ}^2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

在等式(4)中,矩阵 C 的秩也由正的本征值的个数来决定. C 的数值道可以用矩阵 D 、矩阵 C 或 C 的本征值来表示:

$$\text{Tr}(C) = \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N d_{nj}^2 = \sum_{j=1}^J c_{jj} = \sum_{j=1}^J \lambda_j. \quad (5)$$

等式(5)说明立方体内所包含的地震道总能量是 $\text{Tr}(C) \geq 0$,并等于本征值之和.本征结构相干性估计(E_C):

$$E_C = \frac{\lambda_1}{\text{Tr}(C)} = \frac{\lambda_1}{\sum_{j=1}^J c_{jj}} = \frac{\lambda_1}{\sum_{j=1}^J \lambda_j}, \quad (6)$$

其中 λ_1 是本征值 λ_j 中的最大值.由此,本征结构相干性可定义为最大本征值 λ_1 与立方体内总能量的比值.

由协方差矩阵 C 中得出的本征值的个数和相对大小决定了立方体中所包含地震数据的自由度.当地震道是相等的,就能取得最大相干值.在这种简单的情况下,高相干值反映的是地震连续性.随着立方体内地震道出现差异,地震连续性变差、相应的相干性将降低.一般地,立方体内邻近地震道经常导致较高连续性和相应的高的相干值.

相干时窗的选择也很重要,时窗的大小一般根据地震反射波的视周期 T 而定,通常取 $T/2 \sim 3T/2$.当计算的相干时窗小于 $T/2$ 时,不能描述一个完整的波峰或波谷,噪音与层位的影响突出,而且层的定义来源于地震剖面的波组对比追踪,层位拾取的精确程度直接影响预测结果.当计算时窗大于 $3T/2$ 时,包含了多个反射波同相轴,虽然可能会降低分辨率,但地质异常的影响将被突出.图 2 为 $J_1 s^{2-1}$ 段沿层相干体切片,图中暗色条带状代表主断裂的发育方向,基本上以北东向为主.因此,依据相干体切片可以很好地确定断层平面轨迹,结合地震剖面保证断层解释的合理性,指导断裂组合方案.

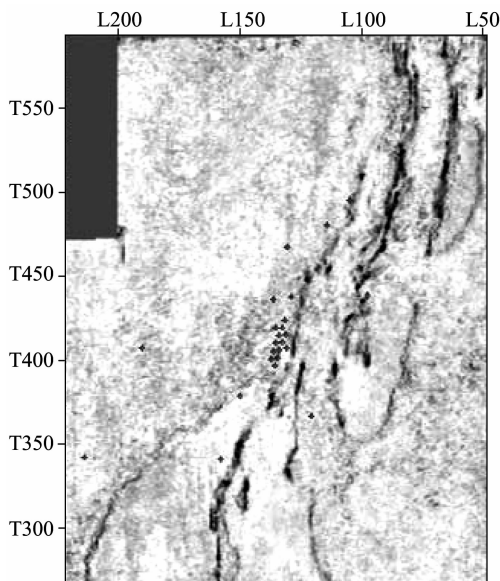
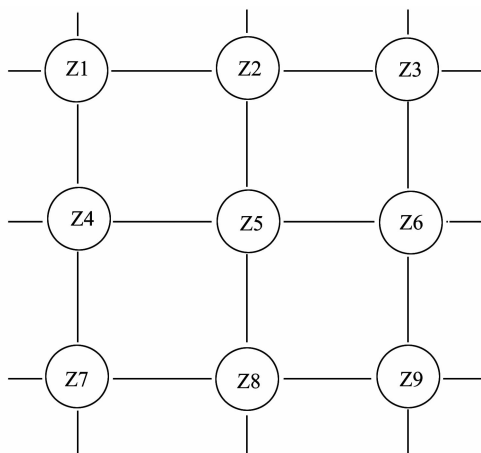
图2 $J_1 s^{2-1}$ 段沿层相干体切片Fig. 2 $J_1 s^{2-1}$ section slice map along horizon

图3 沿层倾角与方位角计算原理

Fig. 3 Principle map of calculation along dip and azimuth angle

2.3 近反射道几何特征分析技术

近反射道几何特征分析是一套集沿层图像处理、断层及裂缝群系处理于一体的综合处理解释技术。它基于精细的构造解释技术,通过对构造层数据进行图像处理,突出由于断层或裂缝群存在而导致的沿构造层面的线性差异,即将线性分布的时间同相轴的错断或挠曲现象用图像处理技术加以突出。可以是沿层或等时的地震数据体切片、地震属性体切片。沿层倾角方位角属性(DipAzim)是沿层倾角和方位角属性的综合。倾角方位角属性的运算主要基于追踪的层位成果数据。在图3中:Z1~Z9代表

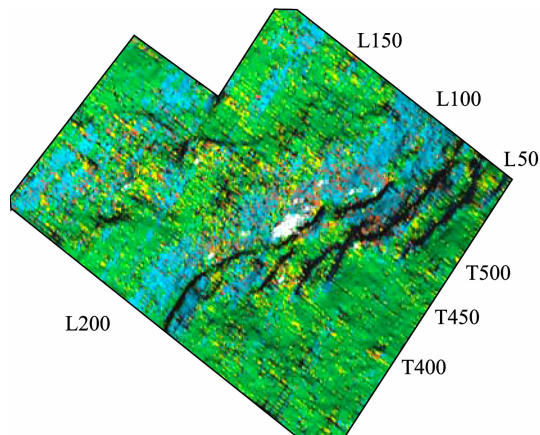
从三维数据追踪到 1×1 层位网格的相邻9个点的 t_0 值,则沿层倾角和方位角定义为

$$a = \frac{g}{1 + g + h}, \quad (7)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{h}{g}\right), \quad (8)$$

式中: α 为倾角; a 为方位角; $g = (Z6 - Z4) / \Delta x$; $h = (Z8 - Z2) / \Delta y$ (Z_i 为追踪层位的 t_0 值, Δx 为 x 方向Z6和Z4两点之间的距离, Δy 为 y 方向Z8和Z2两点之间的距离)。可见,沿层倾角方位角的运算与Z值和道间距密切相关。一般来说,层位数据的质量对应用该属性检测断层的效果起着决定作用。要取得比较好的检测效果,要求输入的层位数据是完全自动追踪和内插的,且不能做平滑处理。由此计算出倾角方位角属性,其异常可以准确地反映断层的存在,它对小断层的识别要比沿层相干效果好。而粗网格追踪、通过空间内插及平滑处理得到的层位数据,运算得到的沿层倾角方位角属性数据变化量小,无法突出异常,不宜用来识别小断层。

图4是 $J_1 s^{2-1}$ 沿层倾角方位角扫描平面图,图中反映了主断裂为北东向延伸。

图4 $J_1 s^{2-1}$ 沿层倾角方位角扫描平面图Fig. 4 Scan plan map of $J_1 s^{2-1}$ dip angle and azimuth angle

有了正演模型分析、相干体分析和近反射道几何特征分析,再充分发挥解释系统的优势,采用三维数据体任意线剖面和平/剖面联合解释,落实各条断层。图5为过M8井东断层任意线地震剖面,图中显示了M8井东断层两侧地震同相轴发生了明显的弯曲褶皱,两盘地层产状相反,上下层挠曲弯褶清楚,故该断层是完全落实的一条小断层。图6显示结合时间切片,确定断层在空间上的闭合情况,调整不合

理或有偏差的断点解释,进而对断裂系统进行合理组合.也可参考断裂在时间切片上的展布方向以及断点闭合位置来指导解释断层的陡缓和长度等.图 7 为从 2800 ms 时间切片以及 Trace496、Trace412 联络线椅状显示,反映了平/剖面上断层与层位解释和闭合的一致性.

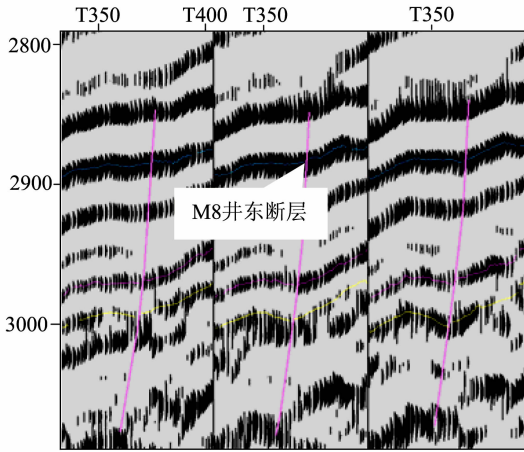


图 5 过 M8 井东断层任意线地震剖面
Fig. 5 Random line seismic profile of through M8 well east faults

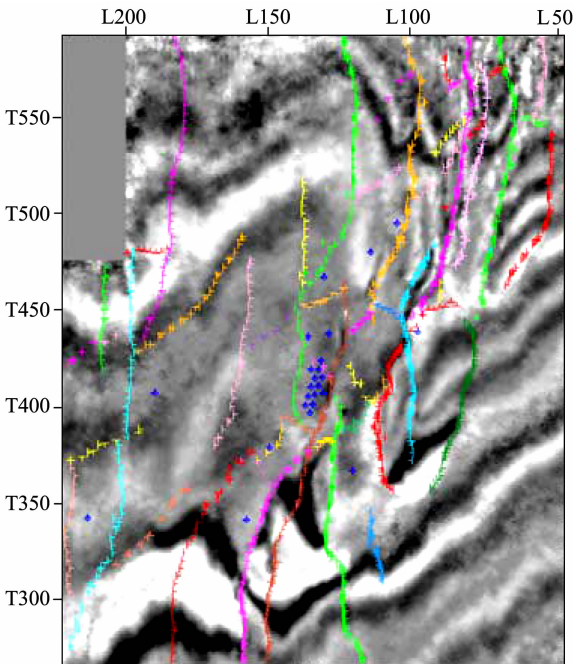


图 6 2892 ms 时间切片与断层闭合点叠合图
Fig. 6 Overlap map on 2892ms time slice and faults joints point

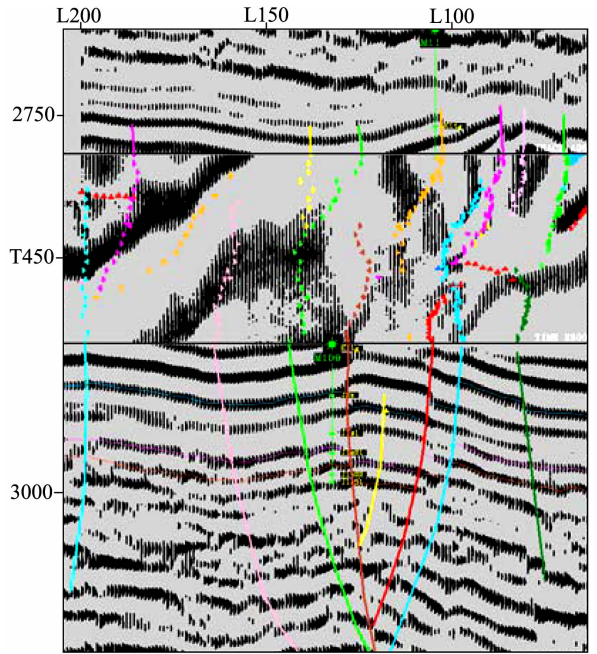


图 7 断层、层位解释椅状显示图
Fig. 7 Chair display map of faults and layer interpretation

3 结论与认识

通过多种技术的应用,本次精细构造解释发现并增加了不少小断层,进一步完善了局部构造形态.总结断层的有效识别方法为:

- (1)通过沿层相干属性技术,结合盆地范围内应力场分析、变形机理分析,找出工区内的大断层;
- (2)通过沿层倾角方位角属性技术,结合工区范围内的构造样式和地震时间剖面分析,检测小断层;
- (3)平面剖面结合,通过地震剖面排查沿层倾角方位角属性可能产生的假断层,结合正演剖面指导、检验小断层^[26~32].

事实上,断层的识别,除了技术因素外,解释人员的专业综合能力及主观能动性也是非常重要的.莱夫赫等在《地球物理综合解释》一文中指出:“一个成熟的解释人员,不仅要在熟悉野外资料采集、处理方面是个奇才,而且要通盘了解地质过程,以及了解地质现象如何影响地震资料.”^[33]因此,实际工作中我们采用各种技术方法时必须注意其有效性,理想的地震资料解释并不是用各种先进方法对地震剖面进行过滤,而是通过分析研究找出一组能对地震剖面进行正确描述的恰当方法.

致 谢 本文撰写过程中,得到了中达奥瑞石油科

技术有限公司的吕云远总经理、韩龙高工、周仁和高工等的热心帮助,在此一并表示感谢。

参 考 文 献 (References):

- [1] 徐开礼,朱志澄. 构造地质学[M]. 北京:地质出版社,1989,270.
Xu K L, Zhu Z C. Tectonic geology[M]. Geology Press(Beijing),1989,270.
- [2] 何樵登,熊维刚. 应用地球物理教程——地震勘探[M]. 北京:地质出版社,1991,195.
He Q D, Xiong W G. Applied geophysics course-seismic exploration[M]. Geology Press(Beijing),1991,195.
- [3] 孙家振,李兰斌. 地震地质综合解释教程[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2002,187.
Sun J Z, Li L B. Compositive interpret course of seism and geology[M]. China University of Geosciences Press(Wuhan),2002,187.
- [4] 陈同俊,崔若飞,郎玉泉,钱进. 煤田采区三维地震精细构造解释方法[J]. 地球物理学进展,2007,22(2):573~578.
Chen T J, Cui R F, Lang Y Q, Qian J. Detail structural interpretation methods of coal 3-D seismic[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007,22(2):573~578.
- [5] 马丽娟,郑和荣,陈霞. 隐蔽油气藏地震预测技术研究新进展[J]. 地球物理学进展,2007,22(1):294~300.
Ma L J, Zheng H R, Chen X. The New progress of seismic forecast technology of Subtle Traps[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007,22(1):294~300.
- [6] 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.
Zhu C H, Huang G Q, Qin T. Methods for detailed fracture system description[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002,41(1):42~48.
- [7] 崔凤林,王允清,陈树民. 松辽盆地北部薄互层地震资料解释方法及效果[J]. 石油物探,2001,40(2):63~76.
Cui F L, Wang Y Q, Chen S M. The Interpretation method and its effects for seismic data from the thin interbedded formations in the north of Songliao Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2001,40(2):63~76.
- [8] 何雨丹,魏春光. 裂缝型油气藏勘探评价面临的挑战及发展方向[J]. 地球物理学进展,2007,22(2):537~543.
He Y D, Wei C G. The present situation and research direction of evaluation methods in fracture type reservoir[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007,22(2):537~543.
- [9] 石建新,王延光,毕丽飞,等. 多分量地震资料处理解释技术研究[J]. 地球物理学进展,2006,21(2):505~511.
Shi J X, Wang Y G, Bi L F, *et al.* The process-interpretation technique of multi-component seismic data [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006,21(2):505~511.
- [10] 姚保华,章振铨,王家林,火恩杰,张先康,刘保金,吴健生,王夫运,于鹏,毛雅萍. 上海地区地壳精细结构的综合地球物理探测研究[J]. 地球物理学报,2007,50(2):482~491.
Yao B H, Zhang Z Q, Wang J L, Huo E J, Zhang X K, Liu B J, Wu J S, Wang F Y, Yu P, Mao Y P. Prospecting and research on fine crustal structure by using multi-geophysics survey methods in Shanghai region[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(2):482~491.
- [11] 周志才,周杰,李崇灿,等. 叠偏剖面的断层解释方法[J]. 石油物探,2002,41(2):207~210.
Zhou Z C, Zhou J, Li C C, *et al.* A method for fault interpretation based on stacked migration section Geophysical Prospecting for Petroleum[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002,41(2):207~210.
- [12] 崔世凌,秦爽,杨泽蓉,等. 惠民凹陷复杂断块精细描述技术及应用[J]. 石油物探,2002,41(3):347~353.
Cui S L, Qin S, Yang Z R, *et al.* The fine description technique of complex fault blocks and its application in Huimin Depression [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002,41(3):347~353.
- [13] 王西文,刘全新,周嘉玺,等. 精细储层预测技术在板南5~3井区的应用[J]. 石油物探,2003,42(3):389~394.
Wang X W, Liu Q X, Zhou J X, *et al.* Application of fine reservoir prediction technique at well5~3 area in Bannan oil-field [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2003,42(3):389~394.
- [14] 朱庆荣,黄雁琳,王敦则. 复杂断层快速三维体解释方法[J]. 石油物探,2003,42(4):456~459.
Zhu Q R, Huang Y L, Wang D Z. Fast 3D data volume interpretation methods for complex faults [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2003,42(4):456~459.
- [15] 秦伟军,张永华,全书进. 精细构造解释与储层预测技术在泌阳凹陷中南部地区二次勘探中的应用[J]. 石油物探,2004,43(1):62~66.
Qing W J, Zhang Y H, Quan S J. Application of fine structure interpretation and reservoir prediction technique in the second exploration of south Biyang Depression [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004,43(1):62~66.
- [16] 毛凤鸣,周方喜,梁兵,等. 复杂小断块油藏储层综合评价配套技术与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2002,40.
Mao F M, Zhou F X, Liang B, *et al.* Comprehensive evaluation techniques and application for small and complex fault blocks reservoir [M]. Petroleum Industry Press (Beijing), 2002,40.
- [17] 张进铎. 地震解释技术现状及发展趋势[J]. 地球物理学进展,2006,21(2):578~587.
Zhang J D. Present status and future trend of seismic data interpretation techniques [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006,21(2):578~587.
- [18] 刘丽峰,杨怀义,蒋多元,等. 三维精细构造解释的方法流程和关键技术[J]. 地球物理学进展,2006,21(3):864~871.
Liu L F, Yang H Y, Jiang D Y, *et al.* Primary exploration of 3-D fine structure interpretation[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006,21(3):864~871.
- [19] 张印堂,刘培体. 渤海6地区高精度处理技术[J]. 地球物理学

- 进展,2005,20(1):49~53.
- Zhang Y T, Liu P T. High-precision processing technology in Boshen 6 area [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005,20(1):49~53.
- [20] 王玉学,韩大匡,刘文岭等.相干体技术在火山岩预测中的应用[J].石油物探,2006,45(2):192~193.
- Wang Y X, Han D K, Liu W L. Application of coherence technique at volcanic rock prediction[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006,45(2):192~193.
- [21] 刘传虎.地震相干分析技术在裂缝油气藏预测中的应用[J].石油地球物理勘探,2001,36(2):238~243.
- Liu C H. Application of seismic coherence analysis technique at fracture reservoir prediction[J]. Exploration of Petroleum Geophysics, 2001,36(2):238~243.
- [22] Marfurt K J.用基于相似的相干算法计算三维地震属性[J].周巍译.石油物探译丛,1996,3:22~37.
- Marfurt K J. Calculate 3D seismic properties using a semblance-based coherency algorithm [J]. Zhou Wei translated. Translate Volume for Petroleum Geophysics, 1996, 3: 22~37.
- [23] Bahorich M, Farmer S. 3-D Seismic discontinuity for faults and stratigraphic features, the coherence cube [J]. The Leading Edge,1995, 14 (10): 1053~1058.
- Bahorich M, Farmer S. 三维地震的断层和地层的不连续性特征以及相干体[J]. 前沿,1995, 14 (10): 1053~1058.
- [24] Marfurt K J, Kirilin R L, Farmer S L, *et al.* 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm [J]. Geophysics,1998, 63 (4): 1150~1165.
- Marfurt K J, Kirilin R L, Farmer S L, *et al.* 基于相似的相干算法分析三维地震属性[J]. 地球物理学,1998, 63 (4): 1150~1165.
- [25] Gersztenkorn 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.
- Gersztenkorn A, Marfurt K J. 基于本征结构的相干算法有助于三维构造和地层成图[J]. 地球物理学,1999, 64 (5): 1468~1479.
- [26] 张明振,谭明友,王兴谋.济阳凹陷第三系隐蔽藏储层配套技术[J].地球物理学进展,2005,20(1):42~48.
- Zhang M Z, Tan M Y, Wang X M. Combined describing techniques of tertiary hidden hydrocarbon reservoir in Jiyang depression [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005, 20(1):42~48.
- [27] 穆星,印兴耀,王孟勇.济阳坳陷储层地震地质综合预测技术研究[J].石油物探,2006,45(4):351~356.
- Mu X, Yin X Y, Wang M Y. Comprehensive reservoir prediction technique by Seism and geology in Jiyang Depression [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006,45(4):351~356.
- [28] 李云,李鹏,颜虹.莫西庄地区三工河组二段储层特征评价[J].地球物理学进展,2007,22(1):227~233.
- Li Y, Li P, Yan H. Charater appraisal of section2 reservoir, sangonghe group, moxizhuang area[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007,22(1):228~232.
- [29] 范军侠,梁锋,田永.海南地区东三段水下分流河道砂体的识别与预测[J].地球物理学进展,2007,22(5):1527~1532.
- Fan J X, Liang F, Tian Y. Recognition and prediction of sub-channel branch sandbodies in the third member of the Dongying formation, Hainan area[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007,22(5):1527~1532.
- [30] 李茂榕,王红亮.博兴洼陷西部沙三段有利储集体分布探讨[J].地球物理学进展,2007,22(5):1566~1570.
- Li M R, Wang H L. Distribution of reservoir sandbodies of the 3rd member of shahejie formation, western of boxing sub-depression[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(5):1566~1570.
- [31] 王建民,杨冬,魏修成,付雷,王典,胡艳飞,郝雪,杨宝俊.多分量地震资料预测松辽盆地兴城地区深层火山岩与有利含气带[J].地球物理学报,2007,50(6):1914~1923.
- Wang J M, Yang D, Wei X C, Fu L, Wang D, Hu Y F, Hao X, Yang B J. Predicting deep volcanic rocks and favorable gas zone near Xingcheng area in Songliao Basin using multi-component seismic data[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(6):1914~1923.
- [32] 孟召平,郭彦省,王赞,潘结南,芦俊.基于地震属性的煤层厚度预测模型及其应用[J].地球物理学报,2006,49(2):512~517.
- Meng Z P, Guo Y S, Wang Y, Pan J N, Lu J. Prediction models of coal thickness based on seismic attributions and their applications[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(2): 512~517
- [33] Lafehr T R.地球物理综合解释[M].徐怀大译.北京:石油工业出版社,1987,295.
- Lafehr T R. Comprehensive interpretation of geophysics [M]. XU Huai-da translated. Petroleum Industry Press(Beijing), 1987,295.