

谢春临,陈树民,姜传金等.趋势面分析与相干体技术在火山岩预测中的应用.地球物理学报,2011,54(2):368~373,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.013

Xie C L, Chen S M, Jiang C J, et al. Application of a method combining trend surface analysis and coherence cube technology to volcanic prediction. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(2):368~373,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.013

趋势面分析与相干体技术在火山岩预测中的应用

谢春临¹,陈树民¹,姜传金¹,程明君²,那晓敏²

1 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院,大庆 163712

2 大庆钻探工程公司地球物理勘探一公司,大庆 163412

摘 要 根据近年来的研究成果,火山岩顶面在形态上主要呈穹窿状,形成局部隆起的构造圈闭,可利用趋势面分析的方法寻找火山口隆起的分布.火山岩气藏往往是复合型气藏,它不仅受火山口的构造控制,还与有利的火山岩储层密切相关,可利用相干体切片技术来圈定有利储层的分布范围.通过这两种技术的结合,既可确定火山口的分布又可圈定有利储层的分布范围,成为近期井位部署的重要技术手段,对火山岩气藏的预测具有普遍意义.

关键词 趋势面分析,相干体切片,火山岩储层

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.013

中图分类号 P631

收稿日期 2010-06-29,2011-01-10 收修定稿

Application of a method combining trend surface analysis and coherence cube technology to volcanic prediction

XIE Chun-Lin¹, CHEN Shu-Min¹, JIANG Chuan-Jin¹, CHENG Ming-Jun², NA Xiao-Min²

1 *Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Company, Daqing 163712, China*

2 *No. 1 Geophysical Exploration Company of Daqing Drilling & Exploration Corporation, Daqing 163412, China*

Abstract According to research results in recent years, the top surface of volcanic rock, mainly dome-shaped in morphology, develops into structural trap in some uplifted zones. With trend surface analysis method, the distribution of uplift crater could be found. Volcanic gas reservoirs are often complex gas reservoirs, which are not only controlled by the construction of the crater, but also closely related to a favorable volcanic reservoir. Coherence cube slicing technology can be used to determine the distribution boundary of available volcanic reservoir. Through the combination of the two technologies, which can determine the distribution of craters and draws the distribution of reservoir, become an important technical means for well placement, and have universal significance on volcanic gas reservoir prediction.

Keywords Trend surface analysis, Coherence cube slicing, Volcanic reservoir

1 引 言

深层火山岩勘探初期(2005 年以前),主要根据火山口和火山岩的地震反射特征,在地震剖面上直接识别.火山岩在垂直地震剖面上的基本特征一般

表现为:强振幅、低频、断续一较连续反射,亚平行、杂乱丘形反射结构,兼有空白杂乱反射结构,具有明显的顶底反射界面^[1].由于火山岩的杂乱地震反射特征,应用常规地震属性(如振幅、频率等)对火山岩的识别效果不理想,杨峰平^[2~5]等在地震属性应用方面进行了很多探索.随着研究的不断深入和地震

技术的发展,一些新的方法和技术被应用到火山岩识别中,其中趋势面分析技术和相干体技术是最具有代表性的两项技术。

趋势面分析技术在地震解释及构造分析中的应用早已出现,由于火山机构表现出的特殊构造特征,发展起了适合于深层火山岩识别的适用技术。姜传金等^[6]率先在松辽盆地深层应用这项技术,得到了火山岩分布的经典图件,为井位部署提供了依据。相干体技术是1995年由Bahorich和Farmer首次提出,该算法已从第一代基于互相关的算法(简称C1算法)、第二代利用多道相似性的算法(简称C2算法),发展到第三代基于特征结构的相干算法(简称C3算法)^[7~13]。相干体技术在国内的应用始于1998年,当时主要是科研人员自主研发的软件,应用相干体切片反映断层的空间展布和岩性变化区(带)^[14~24]。2000年,在Landmark平台Poststack模块新增加的一项功能,使相干体技术得到了推广,主要用于断层解释、河道识别及预测砾岩、石灰岩、火成岩裂缝发育带^[25,26]。大庆油田2005年引入Paradigm公司的EPOS3.0平台,Coherence Cube模块采用第三代本征值算法,使该项技术在松辽盆地的应用得到普及,在断层、裂缝、河道、火山岩等的识别中得到全面应用。尤其在火山岩识别中,相干技术由于对不连续体非常敏感,能对富含裂缝和非均质的火山岩体进行有效识别,是目前火山岩识别中最有效的属性之一。Coherence Cube模块的应用效果得到了业界的高度认可,近年来在松辽盆地北部^[27~30]、南部^[31]、塔里木盆地^[32,33]等应用相干体识别火山岩取得了较好效果。

趋势面分析技术是从构造角度来确定火山口隆起的分布范围,而相干体技术是从不同岩性或不同的火山岩相带的角度来确定富含裂缝的有利火山岩相带的分布范围,这两个范围是不一致的,而这两个范围又有着内在的必然的联系。这两个范围重叠的区域是井位部署的首选区域,这两个范围不重合的区域可作为下步评价钻探的区域。本文正是利用趋势面分析技术和相干体技术的结合,达到对研究区整体评价的目的。

2 趋势面分析的原理及实现方法

2.1 趋势面分析的原理

趋势分析是定量地研究事物在大范围内(上)的变化规律,即研究事物的变化趋势以及事物在局部

范围的特性。趋势面分析就是用一定的数学函数,对客观事物的某一特性或某种组合特征在空间的分布上进行研究,也就是用函数所代表的曲面去拟合或逼近所研究对象的空间分布。

在地质三维建模中,往往采用趋势面分析对地质特征(如地层厚度变化、构造层位顶面或底面的标高变化等地质变量)的空间形态进行分析,其实质是用一定的函数所代表的曲面来拟合该地质体特征空间分布的趋势变化。常用的趋势面分析方法主要为多项式趋势面分析法,具有类似的或相同功能的方法还有许多,如滑动平均、滑动中值、克里格法、谱分析、自协方差分析法及空间滤波等。

2.2 趋势面分析的实现方法

由于火山口往往位于构造高点,先准确解释出火山岩顶面,再用相应的算法对所解释的层位进行滤波处理,形成趋势面(图1)。

图1中,在火山口处火山岩顶面高于趋势面(地震层位的时间值小于趋势面的时间值),而在其他部位火山岩顶面低于趋势面。用火山岩顶面减去趋势面,高于趋势面的位置得负值,反之低于趋势面的位置得正值。给出门槛值0,滤掉所有的正值,使所有正值等于0,这样就可使火山口层面的负值不变,而使其它值全为0(当然门槛值也可不设为0)。对滤掉0值的新层位再加上一个常数(如1000),得到一个全部为正值的层位,对这个层位进行平面或立体的显示,这样只突出火山口等构造高点的显示。

本次研究与姜传金应用的趋势面分析的原理是一样的,但在实现方法上不同。姜传金^[34]通过拉平火山岩底面,显示出火山机构整体,应用的是Petrel软件。本文是拉平火山岩顶面趋势面,保留趋势面以上的火山口,应用Landmark软件。由于Landmark软件比较普及,因此这项技术更方便推广。

3 相干体技术的原理及实现方法

相干体是定量化计算波形相似性的一种方法,它是通过在时空中定义“全局化的”孔径并利用倾角和方位角的计算来实现。此种处理方法可为地震波形空间变化提供准确的成图显示,并可方便直观地与地质特征、沉积环境联系在一起。断层与断裂系统可直接在空间成像或平面成图,而不必在所选垂直剖面上进行主观繁琐的断层解释再对其进行平面组合成图。通过这种方法可更加容易地推定沉积体系,如:河道、超覆、浊积等沉积特征。相干体的计算结果

取决于优化参数的选取,如倾角限制、时空孔径、以及运算法则等.由于近火山口相储层为丘状断续反射,反射结构与其他岩相有明显的不同,因此相干体资料能很好地反映近火山口相火山岩的分布范围.

3.1 相干算法原理

(1) 两道振幅值交汇得到交汇图,并可以确定一个主方向轴(Major axis)和一个最小方向轴(Minor axis).当两道完全一致时,所有样点将按主方向轴排列成一条直线(图 2);当两道完全相反(振幅大小表征的波形)时,所有样点将按最小方向轴排列成一条直线(图 3).

(2) 用两个不同比列的向量分别表示主轴和最小方向轴,一般情况下,长向量沿主轴方向,短向量沿最小方向轴方向.我们可以利用线性代数的矩阵运算很容易的计算本征值,用它作为表征波形差别的参数.

3.2 相干体计算的实现方法

在利用相干算法进行相干计算时要注意以下几个参数的选择:

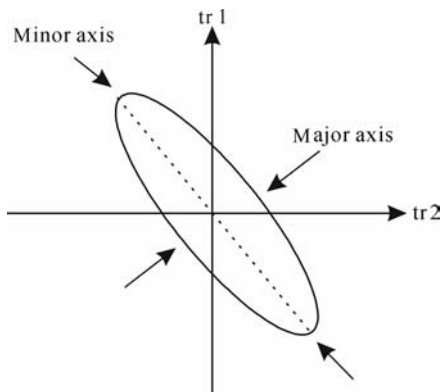


图 2 地震道振幅本征值正相关

Fig. 2 Positive correlation of the eigenvalue for seismic channel amplitude

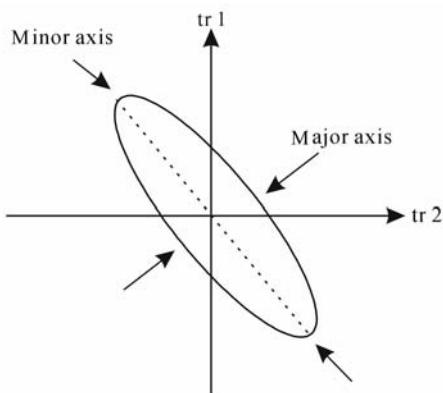


图 3 地震道振幅本征值负相关

Fig. 3 Negative correlation of the eigenvalue for seismic channel amplitude

(1) 倾角参数.针对火山岩体的特点,通过浏览数据了解地层起伏变化情况,确定倾角参数.倾角参数的选取是根据资料反映的地层总体倾角来确定,可在地震资料上测量出来.

(2) 时间孔径参数.时间孔径(或窗口长度)是最重要的参数.大部分参数测试中都包含有得到最好时间孔径这一参数,此参数的建议范围为:大约是目标反射体最高频率波长的一半到最低频率的一个波长之间.长时间孔径可以压制相干体内噪音,但是在较长的计算因子下,范围较窄的同相轴,如河道等将变得模糊不清.通常来说,当要高度突出地层特征或低角度断层时,应使用小的时间孔径;当要突出持续性地质特征,如高角度断层时,应使用较长的时间孔径.

(3) 平面空间孔径参数.空间孔径是以矩形或圆形的方式来说明的.该参数决定参与计算的道数,增加地震道的数量可以压制噪音,但是处理过程较长,并且在远处的地震道上会产生拖尾效应,降低了对小断层的分辨力.同时要考虑地层倾角的变化,对于倾角较大的地层要选得大一些,反之亦然.

通过试验,最后将倾角参数确定为 2 ms/m ,时间孔径为 35 ms ,空间孔径为以采样点为中心的相邻最近的 1 个地震数据道.应用 EPOS 系统的 Coherence Cube 模块计算相干体,再用 Stratimagic 模块编制火山岩顶面相干体切片.

4 应用效果分析

4.1 趋势面分析

本次在松辽盆地北部徐家围子东部地区应用趋势面分析技术预测了火山口的分布(图 4).图 4 中红色和绿色代表构造高点,在本区认为是火山口的分布,黑色线条圈定的范围即是火山口,共识别火山口 18 个.可以看出有的火山口沿着断裂带呈长条背斜分布,多数火山口呈穹窿状分布.绝大多数探井钻在了火山口上并获得工业气流,而没有在火山口上的徐深 16、徐深 211、徐深 213、徐深 271 等井钻探效果不好.少数井打在火山口上(如工区东侧的徐深 25)也没有气层.

4.2 相干体技术

气藏除受构造控制外,储集条件也是重要的控制因素.并非所有火山岩都能成为储层,孔和缝是本区火山岩储集空间的主体^[35].相干体技术是预测孔、缝发育带的有利手段.

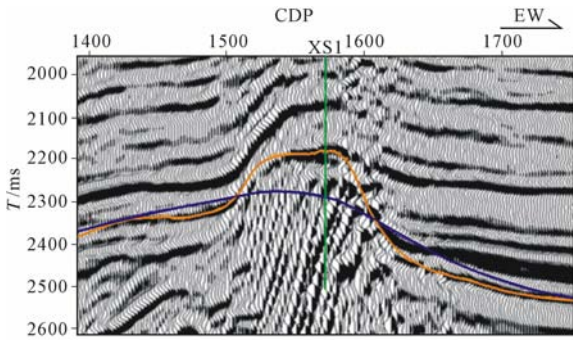


图 1 趋势面分析剖面图

Fig. 1 Profile of Trend surface analysis

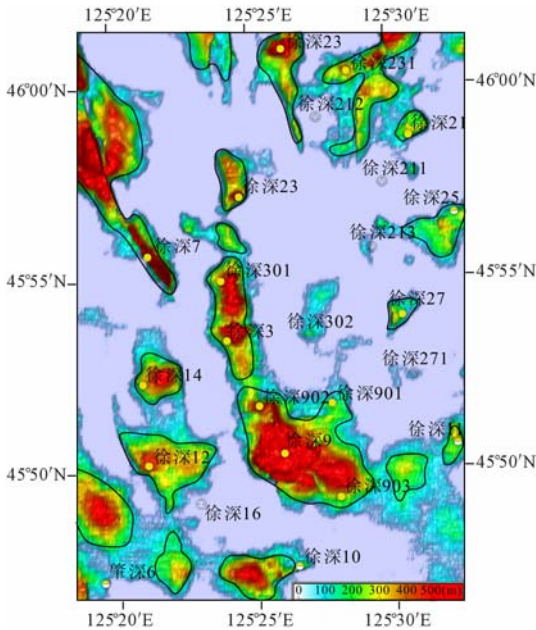


图 4 火山岩顶面趋势面分析立体图

Fig. 4 Three-dimensional map of trend surface analysis in volcanic top

图 5 是该区火山岩顶面相干体切片. 图中颜色从白到黑, 相似性由好变差. 颜色越黑越杂乱的部位, 相似性越差, 孔、缝越发育, 图中粉色线条圈定的是有利火山岩相带的分布范围. 较黑处有环状结构特征的是火山口的特征, 徐深 12、徐深 28、徐深 21、徐深 27 等都处于典型的环状结构中. 从徐深 7 到徐深 9 是沿断裂分布的火山口裂缝发育带. 而其他区域颜色发白, 连续性好, 是其他火山岩相或沉积岩特征, 孔缝不发育. 徐深 302、徐深 211、徐深 213、徐深 271 等井处于较白色区域, 没有气层. 另外, 徐深 10 井处于黑颜色区域, 获得 $3.026 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的低产气流, 产水 85 m^3 , 在趋势面分析图上落在火山口边部, 分析该井产量低的一个原因可能是构造位置偏低, 也可能与区域气水分布有关, 徐深 10 井以南的区域含气性差.

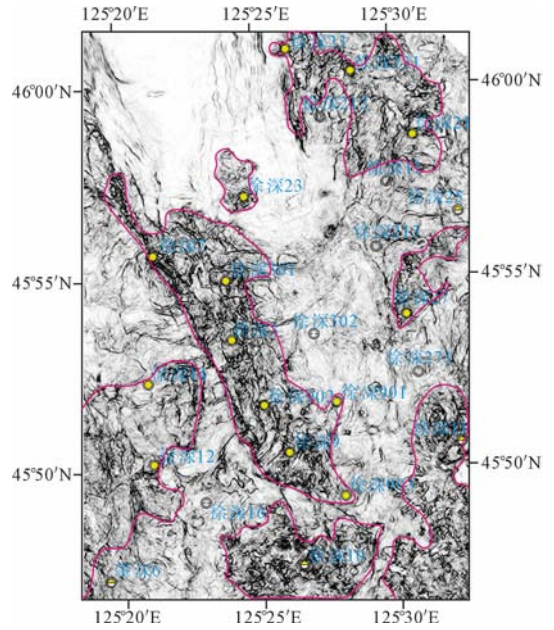


图 5 火山岩顶面相干体切片

Fig. 5 Coherence cube slicing in volcanic top

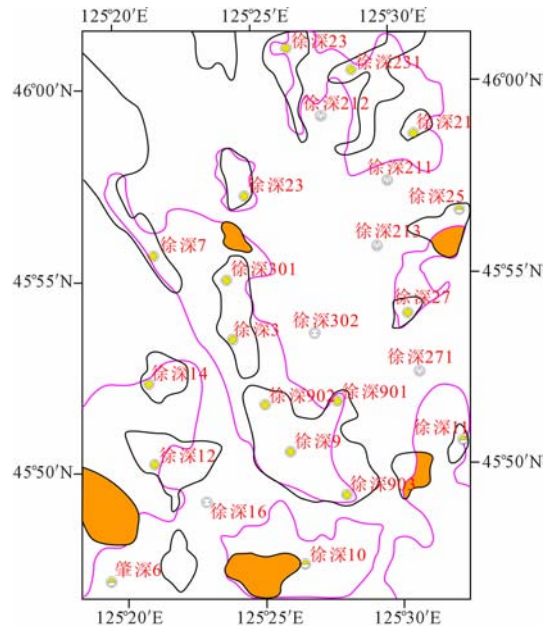


图 6 火山口与有利火山岩相叠合图

Fig. 6 The composite map of crater and favorable volcanic facies

4.3 趋势面分析与相干体技术相结合

将图 4 中黑色线条的区域与图 5 中粉色线条的区域叠合, 可以看出火山口与有利火山岩相带的分布关系. 图 6 中, 徐深 28 井处火山口的范围与有利相带的范围基本一致, 多数火山口处于有利相带的范围内, 有利相带的范围大于火山口的范围. 两者重叠的区域既是构造有利的区域也是岩性有利的区域, 是最有利的区域, 定位 I 类区. 在 I 类区内有 5 个区域(橘黄色)可作为下步钻探的首选目标.

火山口与有利火山岩相带不重叠的区域,可选择有利火山岩相带的区域为Ⅱ类区,该区域处于构造高点之外的有利火山岩相带内,可形成岩性气藏,可作为评价钻探的目标区。

5 结 语

(1)应用趋势面分析的方法,要注意区分火山口与基底突起和沉积岩区的构造高点。因此,应用这种方法要熟悉研究地区的地质情况。

(2)相干体切片能够刻画火山岩有利储层的分布,相干体切片的质量除与参数选取有关外,与地震资料的品质关系很大。

(3)应用趋势面分析的方法确定火山口的位置,应用相干体切片圈定火山岩有利相带的分布范围,通过两项技术的结合,分析了火山口与有利火山岩相带的分布关系,从而指导井位部署。

参考文献(References)

- [1] 崔凤林,曹国银,张向君等. 松辽盆地北部东部深层火山岩处理解释技术及效果. 大庆油田有限责任公司核心技术人才优秀论文集. 北京:石油工业出版社, 2009. 110~116
Cui F L, Cao G Y, Zhang X J, et al. Processing and interpretation techniques of deep volcanic rocks in the north of Songliao basin. Excellent essays of core technical personnel in Daqing Oilfield Company. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009. 110~116
- [2] 杨峰平,李占林,曹国银等. 松辽盆地杏山地区火山岩储层分布地震地质综合预测研究. 特种油气藏, 2003, **10**(1): 95~98
Yang F P, Li Z L, Cao G Y, et al. Prediction of distribution of volcanic reservoirs in Xingshan area of Songliao basin through integrated seismic and geologic study. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2003, **10**(1): 95~98
- [3] 李明,邹才能,刘晓等. 松辽盆地北部深层火山岩气藏识别与预测技术. 石油地球物理勘探, 2002, **37**(5): 477~484
Li M, Zou C N, Liu X, et al. Identifying and predicting technology of deep volcanics gas reservoir in north of Songliao basin. *OGP* (in Chinese), 2002, **37**(5): 477~484
- [4] 张明学,吴杰,胡玉双. 松辽盆地丰乐地区营城组火山岩储层预测. 地球物理学进展, 2009, **26**(6): 2145~2150
Zhang M X, Wu J, Hu Y S. Prediction of reservoirs in volcanic rocks of the Yingcheng formation in the fengle area north of the Songliao basin. *Progress in Geophysics*. (in Chinese), 2009, **26**(6): 2145~2150
- [5] 王元君,王贵重,王建忠等. 地震属性在英买力地区火成岩描述中的应用. 石油物探, 2007, **46**(1): 48~52
Wang Y J, Wang G Z, Wang J Z, et al. Application of seismic attribute in describing igneous rock in Yingmaili area. *GPP* (in Chinese), 2007, **46**(1): 48~52
- [6] 姜传金,冯肖宇,詹怡捷等. 松辽盆地北部徐家围子断陷火山岩气藏勘探新技术. 大庆石油地质与开发, 2007, **26**(4): 133~137
Jiang C J, Feng X Y, Zhan Y J, et al. New methodology to explore gas-bearing volcanic reservoir in Xujiaweizi Fault Depression of the northern Songliao Basin. *Daqing Petroleum Geology and Development* (in Chinese), 2007, **26**(4): 133~137
- [7] Bahorch M S, Bridges S R. The seismic sequence attribute map (SSAM). Expanded abstracts of the 62nd Annual Internet SEG Meeting, 1992. 227~230
- [8] Marfurt K J, Sudhakar V, Gersztenkorn A, et al. Coherency calculations in the presence of structural dip. *Geophysics*, 1999, **64**(1): 104~111
- [9] Mike Bahorich, Steve Farmer. 3D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features—the coherence cube. *The Leading Edge*, 1995, **14**(10): 1053~1058
- [10] Kurt J Marfurt, Ronald M Scheet, John A. Sharp, et al. Suppress of the acquisition footprint for seismic sequence attribute mapping. *Geophysics*, 1998, **63**(3): 1024~1035
- [11] Marfurt K J, Kirilin R L, Farmer S L, et al. 3D seismic attributes using a semblance2based coherency algorithm. *Geophysics*, 1998, **63**(4): 1150~1165
- [12] 王大伟,刘震,陈小宏等. 地震相干技术的进展及其在油气勘探中的应用. 地质科技情报, 2005, **24**(2): 71~76
Wang D W, Liu Z, Chen X H, et al. Progress of seismic coherence and its application to petroleum exploration. *Geological Science and Technology Information* (in Chinese), 2005, **24**(2): 71~76
- [13] 闫德庆,杨飞鹏,郭淑敏等. 应用改进的相干算法提高三维地震资料解释精度. 物探化探计算技术, 2001, **23**(4): 314~317
Yan D Q, Yang F P, Guo S M, et al. Coherency technology and its application in the interpretation of 3D seismic data. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 2001, **23**(4): 314~317
- [14] 王从斌,龚洪林,许多年等. 高分辨率相干体分析技术及其应用. 地球物理学进展, 2008, **23**(5): 1575~1578
Wang C B, Gong H L, Xu D N, et al. High-resolution coherency analysis technique and its application. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, **23**(5): 1575~1578
- [15] 段春节,吴汉宇,马承杰等. 基于高阶统计量的相干体算法在地震中深层构造解释中应用. 地球物理学进展, 2009, **24**(2): 640~643
Duan C J, Wu H N, Ma C J, et al. The Application of higher-order statistics coherency algorithm in seismic data interpretation. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2009, **24**(2): 640~643
- [16] 王西文,杨孔庆,周立宏等. 基于小波变换的地震相干体算法研究. 地球物理学报, 2002, **45**(6): 847~851
Wang X W, Yang K Q, Zhou L H, et al. Methods of calculating coherence cube on the basis of wavelet transform. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(6): 847~851
- [17] 孙夕平,杜世通. 相干体技术算法研究及其在地震资料解释中的应用. 石油大学学报(自然科学版), 2003, **27**(2): 32~35
Sun X P, Du S T. Development and application of algorithm of coherency cub technique to seismic interpretation. *Journal of the University of Petroleum, China* (in Chinese), 2003,

- 27(2):32~35
- [18] 陆文凯,张善文,肖焕钦.基于相干滤波的相干体图像增强.天然气工业,2006,26(5):37~39
Lu W K, Zhang S W, Xiao H Q. Image enhancement of coherence cube based on coherent filtering. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 2006, 26(5):37~39
- [19] 苑书金.地震相干体技术的研究综述.勘探地球物理进展,2007,30(1):7~15
Yuan S J. A review of seismic coherence technique. *Progress in Exploration Geophysics* (in Chinese), 2007, 30(1):7~15
- [20] 靳玲,张本书,苏桂芝等.相干体参数的实验选取.断块油气田,2005,12(2):24~27
Jin L, Zhang B S, Shu G Z, et al. The experiment selection of the concern data parameter. *Fault-Block Oil & Gas Field* (in Chinese), 2005, 12(2):24~27
- [21] 纪彤洲,杨迎军,李尚林.相干体技术在河道预测中的应用.石油物探,2003,42(3):399~401
Ji T Z, Yang Y J, Li S L. Application of coherence technology in the prediction of channel sand. *Geophysical Prospecting For Petroleum* (in Chinese), 2003, 42(3):399~401
- [22] 余德平,曹辉,王咸彬.相干数据体及其在三维地震解释中的应用.石油物探,1998,37(4):75~79
She D P, Cao H, Wang X B. Coherence cube with application to 3-D seismic interpretation. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 1998, 37(4):75~79
- [23] 侯伯刚,乌达巴拉,杨再岩.地震相干体技术简介及其应用.现代地质,1999,13(1):121~124
Hou B G, Wuda B L, Yang Z Y. Seismic coherence cube technology and its application. *Geosciences* (in Chinese), 1999, 13(1):121~124
- [24] 王永刚,刘礼农.利用相干数据体检测断层与特殊岩性体.石油大学学报(自然科学版),2000,24(1):69~72
Wang Y G, Liu L N. Automatic detection of faults and special litho logic body by using coherence algorithm. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)* (in Chinese), 2000, 24(1):69~72
- [25] 胡建玲,杨学学,付兆斌等.相干性分析在构造精细解释及裂缝研究中的应用.勘探家,2000,5(2):37~38
Hu J L, Yang Y X, Fu Z B, et al. Application of Coherence Analysis for Detailed Structural Interpretation and Fracture Study. *Petroleum Explorationist* (in Chinese), 2000, 5(2):37~38
- [26] 张金森,王春红.相干技术在全三维地震解释中的应用.中国海上油气(地质),2000,14(4):277~282
Zhang J M, Wang C H. An application of coherence technique in full 3D seismic interpretation. *China Offshore Oil and Gas (Geology)* (in Chinese), 2000, 14(4):277~282
- [27] 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.石油物探,2006,45(2):192~196
Wang Y X, Han D K, Liu W L, et al. The application of coherence technology in the volcanic reservoir prediction. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2006, 45(2):192~196
- [28] 唐华凤,王璞珺,姜传金等.松辽盆地白垩系营城组隐伏火山机构物理模型和地震识别.地球物理学进展,2007,22(2):530~536
Tang H F, Wang P J, Jiang C J, et al. Physical model and seismic recognition of concealed volcanic edifices of Yingcheng Formation in Songliao Basin. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, 22(2):530~536
- [29] 杨辉,张研,邹才能等.松辽盆地北部徐家围子断陷火山岩分布及天然气富集规律.地球物理学报,2006,49(4):1136~1143
Yang H, Zhang Y, Zou C N, et al. Volcanic rock distribution and gas abundance regularity in Xujiaweizi faulted depression, Songliao basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(4):1136~1143
- [30] 王建民,杨冬,魏修成等.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.地球物理学报,2007,50(6):1914~1923
Wang J M, Yang D, Wei X C, et al. Predicting deep volcanic rocks and favorable gas zone near Xingcheng area in Songliao Basin using multi component seismic data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(6):1914~1923
- [31] 张秀容,杨亚娟,向景红.松辽盆地南部深层火山岩识别及成藏条件分析.勘探地球物理进展,2006,29(3):211~215
Zhang X Y, Yang Y J, Xiang J H. Identifying of volcanic rock and analysis of hydrocarbon accumulation conditions in southern part of Songliao basin. *Progress in Exploration Geophysics* (in Chinese), 2006, 29(3):211~215
- [32] 蔡刚,孙东,裴明利等.相干体技术及其在油气勘探中的应用.天然气地球科学,2006,17(4):510~513
Cai G, Sun D, Pei M L, et al. Coherence cube technique and its application in hydrocarbon exploration field. *Natural Gas Geoscience* (in Chinese), 2006, 17(4):510~513
- [33] 张进铎.地震解释技术现状及发展趋势.地球物理学进展,2006,21(2):578~587
Zhang J D. Present status and future trend of seismic. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2006, 21(2):578~587
- [34] 姜传金,陈树民,初丽兰等.徐家围子断陷营城组火山岩分布特征及火山喷发机制的新认识.岩石学报,2010,26(1):63~72
Jiang C J, Chen S M, Chu L L, et al. A new understanding about the volcanic distribution characteristics and eruption mechanism of Yingchen Formation in Xujiaweizi fault depression. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2010, 26(1):63~72
- [35] 王璞珺,冯志强等.盆地火山岩:岩性·岩相·储层·气藏·勘探.北京:科学出版社,2007.45~57
Wang P J, Feng Z Q, et al. Volcanic Rock of Basin: Lithology, Lithofacies, Reservoir, Gas field and Exploration (in Chinese). Beijing: Science Press, 2007. 45~57