

Application of Fault Unsupervised Pattern Recognition Technology in Y Gas Field

Ning Yin^{1,2} Airong Li^{1*} Qing Wang^{1,3} Xiaochuan Yang² Jun Zhu²

1.School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

2.Korla Branch of Bureau of Geophysical Prospecting Co., Ltd. CNPC, Korla, Xinjiang, 841001, China

3.Geological Research Center of Geophysical Prospecting Co.,Ltd. CNPC, Zhuozhou, Hebei, 072750, China

Abstract

Fault identification has always been the basis for the fine description of the oil and gas reservoir structure in the Y area and the in-depth understanding of the gas reservoir. By analyzing the drawbacks of wavelet transform (CWT) frequency division reconstruction data volume method to extract fracture attributes, combined with the current artificial intelligence big data analysis technology, the unsupervised pattern fracture recognition technology under the condition of dominant frequency is proposed for the first time, let the computer automatically collect and classify certain fractures with common characteristics through learning and comparison, and describe the distribution characteristics of single-scale and full-scale fractures, and improve the lateral resolution of fractures. Through the application in Y area, the fine characterization of internal faults of gas reservoir is realized, the energy and time of interpretation personnel to analyze data are saved, the ideal fracture mode results are obtained, the understanding of gas reservoir is deepened, and the evaluation of reservoir development potential and later well location deployment are effectively supported.

Keywords

wavelet transform; fault; superiority frequency; unsupervised pattern recognition

断裂无监督模式识别技术在 Y 气田的应用

尹宁^{1,2} 李爱荣^{1*} 王青^{1,3} 杨小川² 朱君²

1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 中国·陕西 西安 710065

2. 东方地球物理公司研究院库尔勒分院, 中国·新疆 库尔勒 841001

3. 东方地球物理公司研究院地质研究中心, 中国·河北 涿州 072750

摘要

断裂识别一直是Y地区油气藏构造精细描述以及气藏深化认识的基础。通过分析小波变换(CWT)分频重构数据体提取断裂属性方法的弊端,结合目前人工智能大数据分析的技术,首次提出了优势频率条件下无监督模式断裂识别技术,让计算机通过学习比对的方式,自动地将某些具备共同特性断裂进行集和分类,刻画出了单一尺度和全尺度断裂的展布特征,提高断裂的横向分辨能力。通过在Y地区的应用,实现气藏内部断裂精细刻画,节省解释人员分析数据的精力和时间,得到了理想断裂模式结果,深化了气藏认识,有效支撑了油藏开发潜力评价及后期井位部署。

关键词

小波变换; 断裂; 优势频率; 无监督模式识别

1 引言

随着油气勘探开发的不断深入,断裂的识别精度所占比重逐渐增加。在塔里木盆地,受到目的层埋藏深度大,普遍在5000m左右,地表条件差,沙漠和戈壁等因素的影响,

导致地震资料品质相对较差,分辨率严重不足,单纯运用常规断裂几何属性难以精细识别以开发油气藏的小断裂。本次结合当前人工智能大数据分析的方法,提出了优势频率条件下无监督模式断裂识别技术,通过在塔里木盆地H气田的应用,取得了一定的效果。

【作者简介】尹宁(1989-),男,中国天津人,本科,工程师,从事地震资料解释研究。

【通讯作者】李爱荣(1976-),女,中国河北人,博士,副教授,从事油气田地质与开发研究。

2 背景介绍

H气田位于塔北隆起轮台断隆中段。该气田整体呈北东走向,受南侧大断裂控制,由多个沿断层发育的中新生代反向屋脊型局部构造组成。H气田是国内第一个超高压循环

注气部分保压开采的整装凝析气田^[1]。其主要目的层为新近系吉迪克组底砂岩段、古近系底砂岩段和白垩系巴什基奇克组顶部砂岩。近年来，H气田已进入开发调整阶段，受断裂和构造等方面的影响，钻井误差较大，气藏内部井位优选难度大，目前迫切需要气藏微构造及多尺度进行精细刻画，进而提高气藏认识精度，精细开发方案，实现气藏高效开发。

该地区在1996年之后未进行地震三维重采集，目前研究一直使用的是1995年采集的地震三维资料，覆盖次数低，炮道密度低，同时，H气田主要目的层埋深均在4900m以上，地下构造复杂，形态难把握，速度变化剧烈，拾取难度大。受到当时采集技术和气藏自身构造的影响，地震资料品质较差，断裂识别分辨率较低、识别难度大。

随着气田逐渐进入开发阶段，越来越多的钻井动态证实气藏内部主断裂刻画不准确同时在主断裂附近伴生发育小断裂，对气藏开发准确认识及井位优选产生了较大的影响。综合分析认为，目的层段大尺度断裂、小尺度微断裂识别的主要难点在于：

①受采集参数和主要目的层埋藏深度（均在4900m以上）的影响，地震资料背景噪声严重，地震资料信噪比相对较低，不利于大尺度断裂和小尺度断裂的直观体现；

②由于目的层段深埋之后，压实作用强，地震同相轴连续性高，大尺度断裂、小尺度断裂的断点位置识别难度大；

③开发阶段对大尺度断裂、小尺度断裂识别精度要求高，断层面的空间影响规模远小于地震资料面元的级别，需要不断提高断裂识别技术能力。

在本次的研究过程中，针对上述三项断裂识别的难点，提出了优势频率条件下无监督模式识别断裂技术，对H地区开展多尺度断裂识别刻画工作。一是运用小波变换(CWT)的方法对原始地震数据体进行分频重构，提高不同尺度断裂的分辨能力，筛选能够突显不同尺度断裂的分频体，得到了可用于研究不同尺度断裂的优势频率数据体集；二是基于优势频率数据体，针对不同尺度断裂，提取多种不同类型属性，得到大量断裂属性平面图；三是基于大量多种不同类型断裂属性平面图，采用断裂无监督模式识别的方法，让计算机通过学习比对的方式，自动地将某些具备共同特性断裂进行集和分类，得到能够准确反映单一尺度断裂和多尺度断裂的平面展布图，提高断裂的横向分辨能力，实现气藏内部断裂精细刻画。

3 主要方法及应用效果

3.1 地震资料分频及优势频率筛选

在开展断裂识别工作之前，对当前断裂刻画技术及方法进行了文献调研工作，发现除了一些特色的断裂属性外，目前对小波变换(CWT)分频重构后的数据体进行属性提取断裂刻画的方法已成为断裂刻画识别的流行方式^[2]。受到地震资料带限影响，不同的地质体分辨能力受到了一定限制，但通过运用分频的方法，不同的单频体对不同地质更加敏感，不同的单频体更能够反映不同的地质特征。对于本次研究的断裂而言，不同尺度的断裂在其相对应的频率下，断点会得到最佳成像效果。针对这种能够突显不同尺度断裂的频率称之为优势频率^[3]。在优势频率之下，不同尺度的断裂特征分辨能力更强，更具优势。在以上认识的基础上，开展小波分频重构工作，进而来实现优势频率的筛选^[4]。

小波变换是将原始信号变换成随着小波函数时间移动和尺度伸缩的一系列系数，式中： $f(t)$ 为地震道； $\psi(t)$ 为小波母函数； $\psi^*(t)$ 为 $\psi(t)$ 的复共轭； a 为尺度因子， b 为时移因子，对同一尺度 a ，信号可以分解成不同时移 b 的小波的叠加；CWT表示连续小波变换； $W(a,b)$ 是小波和局部信号之间相互关系的小波系数。即：

$$W(a,b) = \text{CWT}(a,b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle \\ = \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt = \int_{\mathbb{R}} f(t) |a|^{-\frac{1}{2}} \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt$$

在计算出小波系数的基础上，可通过小波反变换对感兴趣的频率区段信号进行重构或部分重构，即：

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{CWT}(a,b) \psi_{a,b}(t) \frac{1}{a^2} dt da \\ = \frac{1}{C_{\psi}} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{CWT}(a,b) |a|^{\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{1}{a^2} dt da$$

利用上述公式进行小波反变换，即可实现分频重构，得到分频数据体。

对原始地震数据体进行分析，认识到该套地震资料有效频带为14Hz至53Hz，因此，本次分频从15Hz开始以5Hz为间隔，至55Hz结束，共得到9个单频体。对分频之后的结果进行分析（见图1），对比发现低频段单频体地震剖面虽然成像分辨率降低，小尺度断裂无法识别，但对大尺度断裂特征敏感，从分频结果剖面上看，15Hz到30Hz的单频体剖面上，断裂边界同相轴较原始地震剖面更加收敛，断点更加干脆，同时大尺度断裂的纵向连续性也得到了提升，较好地反映大尺度断裂特征（图1中蓝色虚线圈所示）。

在中高频段 35Hz 到 55Hz 单频体地震剖面上,地震成像分辨率较原始地震剖面明显提升,同时小尺度断裂的分辨能力也得到提高,较原始地震剖面更加清晰干脆。但大尺度断裂特征逐渐弱化,断裂边界特征与原始地震剖面特征较为相似,分析认为该频率段对小尺度断裂反映效果较好,敏感度高,对大尺度断裂反映效果较差,敏感度低(图 1 中蓝色箭头和绿色虚线圈所示)。针对分频结果,结合不同单频体对不同尺度断裂的突显程度,进行优势频率筛选,最终筛选出 6 个优势频率体,其中低频段选取 15Hz、25Hz、30Hz 频率,作为主要反映大尺度断裂的优势频率体。中高频段选取 35Hz、45Hz、50Hz 频率,作为主要反映小尺度断裂优势频率体。

3.2 优势频率条件下断裂属性提取

针对这 6 个优势频率体,开展多种属性对断裂进行识别刻画工作,论文仅展示了其中的相干类属性和曲率类属性效果。从平面效果上看,相干属性主要反映大尺度断裂特征(见图 2),小尺度断裂识别效果差。构造曲率属性能够反

映一些小断裂特征(见图 3),但大尺度断裂识别效果差,同时背景噪声干扰严重。振幅曲率属性相对于常规曲率属性(见图 4),平面结果背景噪声得到很好的压制,同时能够反映小尺度断裂特征,但大尺度断裂识别效果仍较差。

按照对小波变换(CWT)分频重构后的数据体进行属性提取断裂的方法,下一步将要逐一断裂属性平面进行人工分析。但通过试验,发现该方法存在两点弊端:

①数据量计算量庞大,人工分析更加烦琐,费时费力:原始地震数据体进行分频之后,所需要计算的数据量翻倍增长,所需分析的平面属性也是翻倍增长的,直接导致解释人员需要耗费更大的精力去对属性结果进行逐一分析,并且在分析的过程中会,受到人为主观因素的影响,很可能会遗漏部分有效信息。

②从分频之后的属性结果上看,单一属性往往只能反映某一种尺度的断裂特征,无法顾及多种尺度断裂特征,后期仍需要人工对数据进行分析,开展比例融合或者 RGB 融合显示等工作,更加烦琐。

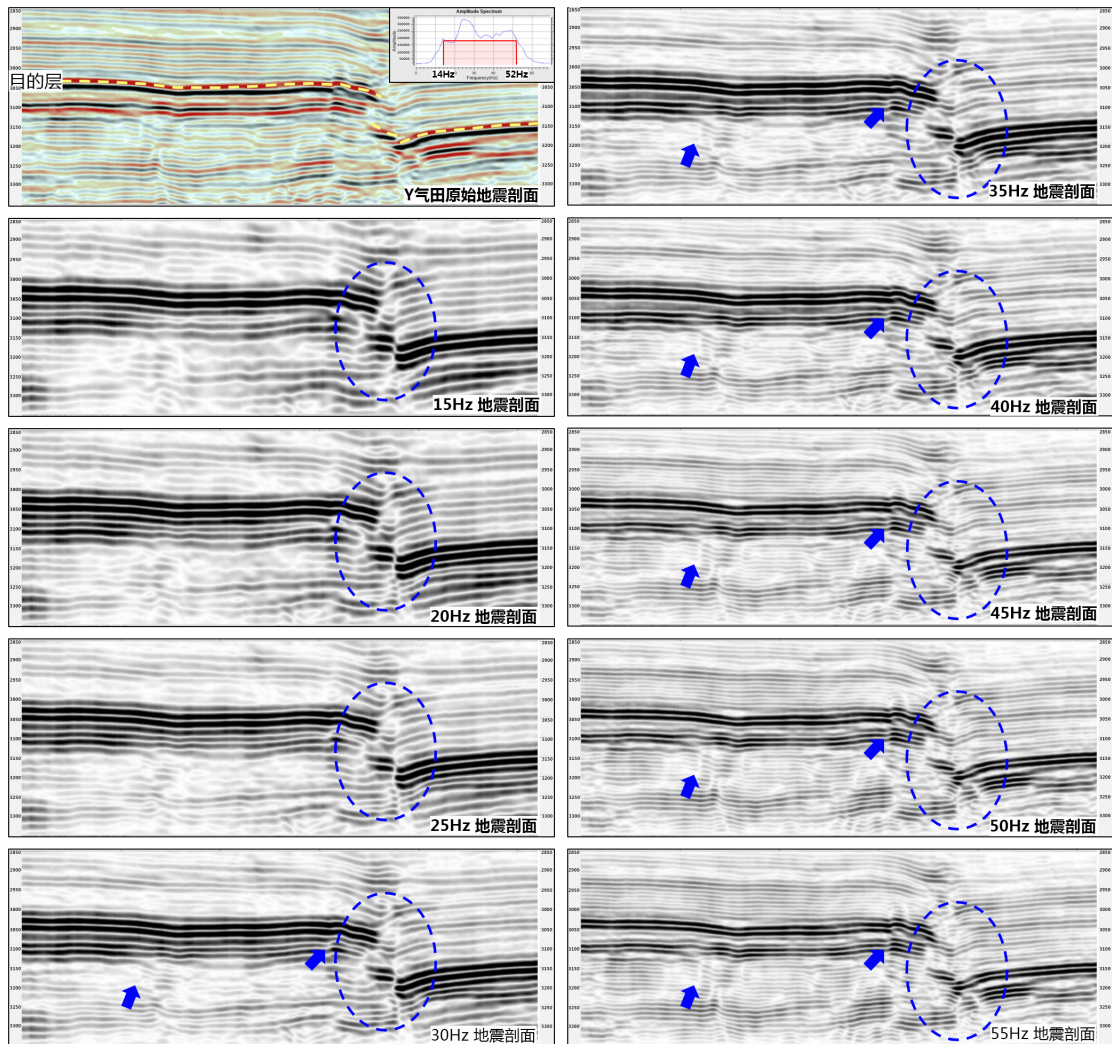


图 1 原始地震剖面和分频之后地震剖面

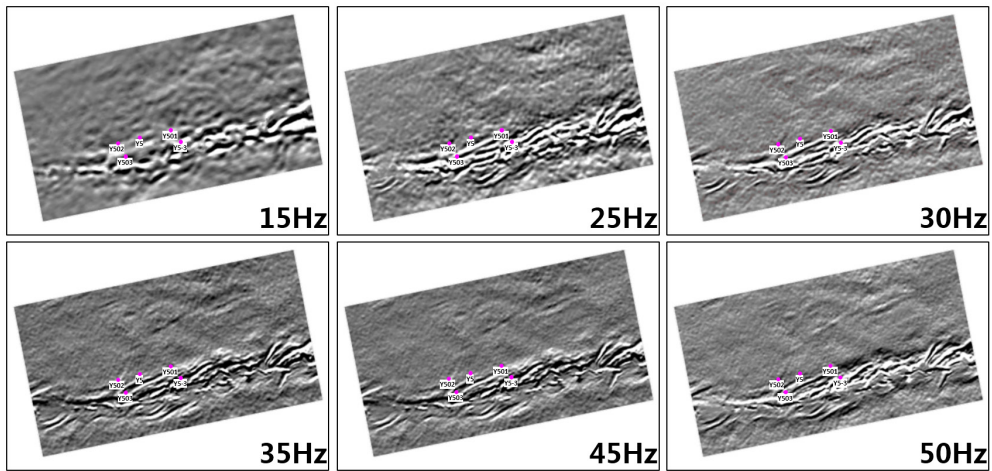


图2 优势频率下相干属性断裂平面图

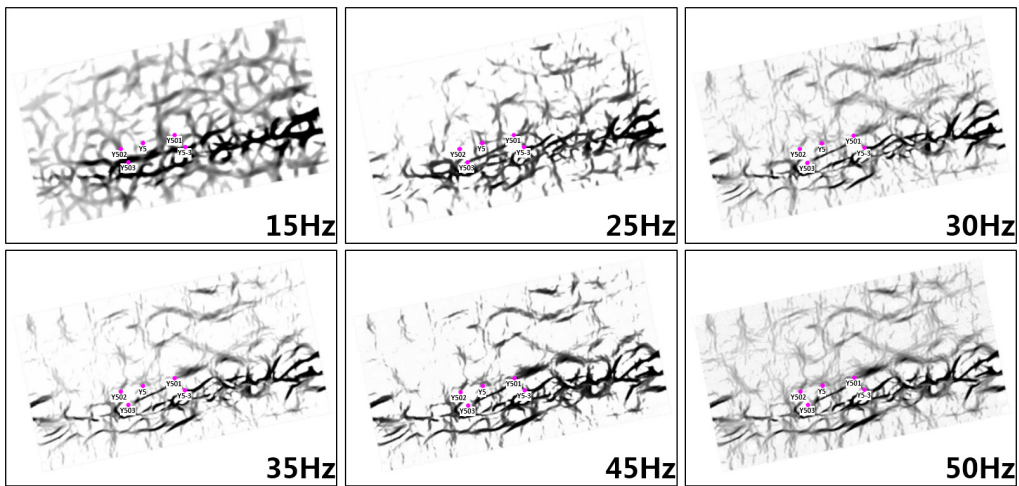
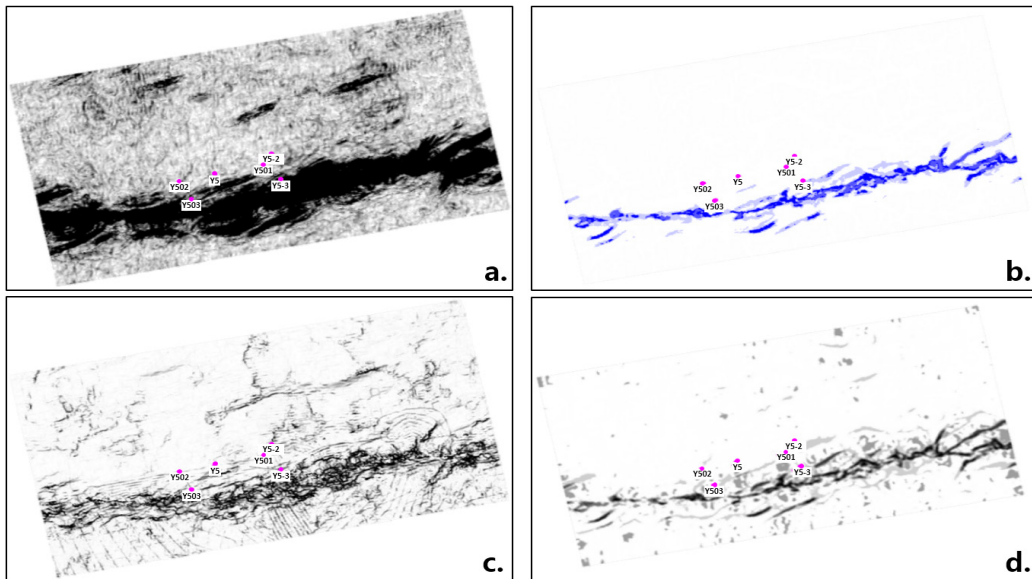


图3 优势频率下构造曲率属性断裂平面图



a. 全频段地震常规相干属性平面图; b. 优势频率下相干属性无监督模式识别后平面图; c. 全频段地震常规曲率属性平面图; d. 优势频率下曲率属性无监督模式识别后平面图

图4 单一属性模式识别后效果对比图

3.3 断裂无监督模式识别技术

针对目前已逐步进入人工智能、大数据分析的时代，本次研究过程中，拓展思路、创新方法，将人工智能大数据分析的思路引入本次研究中，首次提出了断裂无监督模式识别技术，运用该方法来开展多尺度断裂识别刻画工作。

模式识别技术是计算机的一项自动学习分析技术。计算机通过学习比对，自动地将某些具备共同特性地理对象进行集和分类。目前，中国模式识别方法主要应用在地震相分析、岩相预测、油气预测及储层参数估计等方面^[5]。本次，首次将该项技术应用到断裂的识别刻画中。

由于是对断裂进行模式识别，无先验样本点的参考，因此本次采用无监督模式识别的方法对断裂信息进行识别刻画。其核心算法是改进的模糊C均值聚类算法。模糊C均值聚类作为一种对硬C均值聚类方法的改进，首先由Dunn^[6]提出，经Bezdek^[7]改进，引入了模糊加权指数，将Dunn提出的目标函数推广到了更一般的形式。与硬C均值聚类法的主要区别在于模糊C均值聚类在聚类中加入了模糊集的概念，使得聚类过程不完全依赖于样本与聚类中心的距离。在对样本类标定时，同时考虑样本与聚类中心的距离和隶属度。隶属度是评价样本符合类的程度的参数，取值在[0, 1]，隶属度越大表示样本点越符合对应的类，样本集的隶属度构成一个隶属度矩阵。其中，模糊C均值算法的计算步骤如下：

- ①初始化聚类中心C；
- ②分别计算样本与每个聚类中心 c_k 的欧氏距离和隶属度 u_{ik} ；
- ③根据隶属度更新聚类中心C；
- ④计算目标函数J；
- ⑤若目标函数J满足算法收敛条件，输出隶属度矩阵U和聚类中心C；若不满足，返回步骤②。

设样本集为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ ，样本个数为N，

聚类中心为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ，类别数为n，则样本 x_i 与聚类中心 c_k 的欧氏距离的平方为 $d_{ik}^2 = \|x_i - c_k\|^2$ ，隶属度 u_{ik} 和聚类中心 c_k 的计算公式如下：

$$u_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{d_{ik}}{d_{ij}}\right)^{\frac{2}{m-1}}}$$

$$c_k = \frac{\sum_{i=1}^N u_{ik}^m x_i}{\sum_{i=1}^N u_{ik}^m}$$

式中，参数m控制模糊权重。

将之前优势频率下的多属性结果进行无监督模式识别之后，视分辨率明显提高，断裂更加清晰干脆。同时对于同种属性模式识别后，更能准确地刻画某一尺度的断裂特征。将模式识别之后的相干属性与全频段地震所提取的相干属性进行对比可以看出，常规地震相干断裂的分辨率很低，背景噪声比较严重，但模式识别之后的相干属性背景噪声得到很好的压制，同时断裂的分辨能力也得到很好的提升，断裂的边界更加聚焦，大尺度断裂的特征得到更加清晰的刻画，更加准确反映了气藏断裂的整体形态。

将模式识别之后的曲率属性与全频段地震所提取的曲率属性进行对比可以看出，常规曲率断裂受到背景噪声的影响，断裂特征杂乱，断层之间的相互关系模糊不清，分辨能力低，但模式识别之后的曲率属性在背景噪声得到一定压制的同时，更加精细、准确地刻画了小尺度断裂的平面展布特征，小尺度断裂的识别精度明显提高。其中，图5为全属性模式识别后平面效果示意图（5区）。

将优势频率下提取的多种属性全部进行模式识别，所得结果较全频段地震所提断裂属性进行对比可以看出，多种属性模式识别的结果背景噪声压制效果较好，断裂平面边界更加收敛，细节刻画更加精细。对比单一属性模式识别的结果，所得断裂结果断裂数目更多，细节更加丰富，在反映大尺度断裂同时小尺度断裂也得到很好的展示。同时，利用模

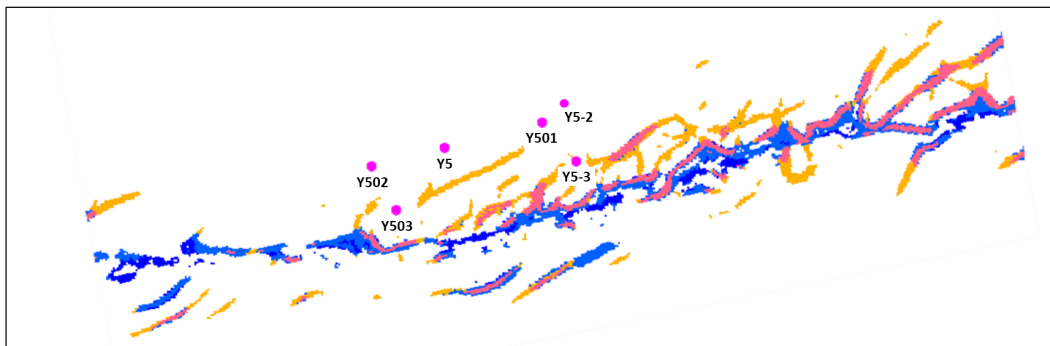


图5 全属性模式识别后平面效果图（5区）

式识别的方法可以识别到多尺度断裂的综合特征，省去了后期人工对数据进行分析，开展比例融合或者 RGB 融合显示等烦琐工作。

将该项技术对 H 全区重新进行断裂梳理，所得结果较老断裂平面展布有着巨大改善，模式识别后断裂更加清晰干净，背景噪音被滤除，图像的边缘和灰度突变部分得到了增

强，灰度的反差有利于解释人员进一步进行研究。在新钻井、新断裂的认识基础上，滚动评价主断裂南侧断块及大断裂下盘潜力、扩大含气面积 1.584km²。估算增加地质储量 14.8 亿方气，100 万吨凝析油。该技术的应用对该区多种尺度断裂的识别、油气藏内部滚动扩边、井位优选起到了关键作用（见图 6）。

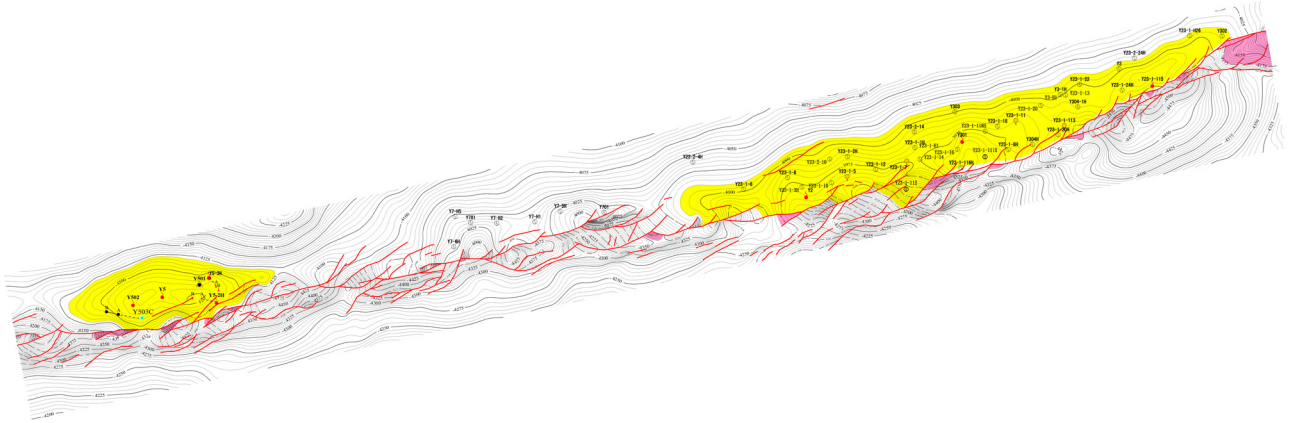


图 6 Y 全区断裂模式识别后构造图

4 结论

地震资料不同的频率能够反映不同尺度的断裂特征，其中的优势频率更能提高不同尺度断裂的分辨能力。应用无监督模式识别的方法，不仅能够展示单一尺度断裂细节，还能精细刻画多种尺度断裂特征。另外，让计算机自主学习对断裂特征进行刻画，更能节省解释人员分析数据的精力和时间，同时得到理想模式结果。

参考文献

[1] 宋文杰,江同文.塔里木盆地H凝析气田地质特征与开发机理研究[J].地质科学,2005,40(2):274-283.
 [2] 柏冠军,赵汝敏,杨松岭,等.优势频带相位分析技术在AA区块断

层解释中的应用[J].石油物探,2011,50(5):513-516.

[3] 陈学华,贺振华,黄德济.基于广义S变换的地震资料高效时频谱分解[J].石油地球物理勘探,2008,43(5):530-534.
 [4] Marfurt K J, Kirlin R L. Narrow band spectral analysis and thin bed tuning[J]. Geophysics, 2001,60(4):1274-1283.
 [5] 许建华,蔡瑞.神经网络在油气预测中的应用[J].石油物探,1998, 37(1):71-76.
 [6] 张阳,邱隆伟,李际,等.基于模糊C均值地震属性聚类的沉积相分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(4):53-61.
 [7] Dunn J C. A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact well-separated clusters[J].Journal of Cybernetics,1973(3):32-57.