

南海石油天然气地球物理勘探新技术专题

叠后多属性在潜山断裂系统描述中的应用研究

邹雅铭^{1,2}, 刘道理^{1,2}, 黄媛^{3,4}, 刘徐敏^{1,2}, 陶禹^{1,2}, 张星宇^{1,2}, 陈双全^{3,4*}

1 中海石油深海开发有限公司, 深圳 518054

2 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054

3 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

4 中国石油大学(北京)CNPC物探重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, chensq@cup.edu.cn

收稿日期: 2023-05-22

国家自然科学基金项目(41574108, 42174130)、物探应用基础实验和前沿理论方法研究(2022DQ0604-03) 联合资助

摘要 南海北部深水区白云凹陷区域毗邻生烃超压带, 成藏条件优越, 拥有巨大的勘探潜力, 同时深层潜山圈闭发育, 潜山内幕裂缝带是油气运移通道。因此, 针对深层潜山有利圈闭预测是该区油气勘探的一个重要方向。受构造作用及风化作用的影响, 潜山内幕地震响应特征表现为杂乱反射、弱反射和空白反射的特点, 这无疑增加了储层预测的难度。针对上述问题, 论文充分利用叠后地震数据开展多属性分析, 并在此基础上形成了一套分级分尺度的叠后地震潜山储层预测方案及技术流程。该方法主要依据断裂尺度大小与地震数据分辨率的相对大小关系, 将断裂划分为大尺度断层、亚断层和微断裂, 并利用不同叠后地震属性来分级描述。首先, 在人工构造解释的基础上, 利用叠后地震数据的本征值相干属性来刻画亚断裂, 并在滤波处理的基础上, 采用倾角增强、断层增强和线性增强对大尺度断裂进行精细刻画。其次, 对比分析曲率属性体和最大似然属性, 优选最大似然属性对中小尺度微断裂进行刻画, 确定裂缝发育区。最后, 在分级刻画的基础上进行多属性叠合刻画微断裂发育带。选取南海北部深水区白云凹陷东潜山勘探区进行了实际应用, 通过对不同尺度大小的断裂目标体进行不同属性的描述和多属性叠合解释, 提高了对潜山微断裂发育带的刻画精度, 确定了潜山有利储层目标区域。实际数据应用结果表明: 叠后多属性断裂系统描述方案可以很好地进行断裂型储层的分级描述, 并在地质认识的基础上确定优质目标区。论文提出的分级分尺度储层断裂刻画方案可在其他类似的潜山油气勘探开发中应用。

关键词 深水区; 潜山; 亚断层; 裂缝预测; 多尺度

Application of post-stack multi-attributes in the description of submerged mountain fault and fracture development

ZOU Yaming^{1,2}, LIU Daoli^{1,2}, HUANG Yuan^{3,4}, LIU Xumin^{1,2}, TAO Yu^{1,2}, ZHANG Xingyu^{1,2}, CHEN Shuangquan^{3,4}

1 CNOOC Deepwater Development Limited, Shenzhen 518054, China

2 Shenzhen Branch of CNOOC China Limited, Shenzhen 518054, China

引用格式: 邹雅铭, 刘道理, 黄媛, 刘徐敏, 陶禹, 张星宇, 陈双全. 叠后多属性在潜山断裂系统描述中的应用研究. 石油科学通报, 2023, 06: 725-737

ZOU Yaming, LIU Daoli, HUANG Yuan, LIU Xumin, TAO Yu, ZHANG Xingyu, CHEN Shuangquan. Application of post-stack multi-attributes in the description of submerged mountain fault and fracture development. Petroleum Science Bulletin, 2023, 05: 725-737. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.06.067

3 National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China
4 CNPC Key Laboratory of Geophysical Exploration, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract The Baiyun Depression area, located in the northern deep-water region of the South China Sea, is situated adjacent to a hydrocarbon-generating overpressure zone. This region not only exhibits exceptional conditions for hydrocarbon reservoir formation but also has immense potential for exploration. At the same time, the development of deep buried-hill traps has given rise to structural closures, with the fracture zones within these hills serving as conduits for the migration of oil and gas. Consequently, predicting favorable traps associated with these potential closures becomes imperative in the oil and gas exploration endeavors within this region. In response to the challenges posed by tectonic forces and weathering effects, the seismic response characteristics within these hills often present as chaotic reflections, weak reflections, and blank reflections. These characteristics undeniably amplify the complexity of reservoir prediction. To address these challenges, we adopted a comprehensive approach, extensively utilizing post-stack seismic data to conduct a thorough study involving multi-attribute analysis. Subsequently, a sophisticated set of multi-scale post-stack seismic buried-hill reservoir prediction schemes and technical workflows are established. We classified fractures in nature into large-scale faults (faults), sub-fractures, and micro-fractures based on the relative size relationship between fault scale and seismic data resolution. Different post-stack seismic attributes are used to describe the classification. Initially, coherent attributes of post-stack seismic data are utilized for characterizing sub-faults through manual structure interpretation. Additionally, filter processing is applied, deploying dip enhancement, fault enhancement, and linear enhancement techniques to finely characterize large-scale faults. Subsequently, through a comparative analysis of curvature attribute volumes and maximum likelihood attributes, the maximum likelihood attribute is chosen to characterize small and medium-scale micro-fractures, facilitating the determination of areas rich in fractures. A hierarchical characterization is then meticulously conducted, comprehensively describing micro-fault development zones through multi-attribute superposition. The practical application of this approach is centered on the east buried-hill exploration area of the Baiyun Depression in the deep-water region of the northern South China Sea. By articulating various attributes and integrating multiple attributes of fault bodies of different scales, the precision of delineating the development zone of micro-faults within the buried hill is significantly enhanced. This, in turn, aids in determining the target area of beneficial reservoirs within the buried hill. The application results using real field data affirm that the proposed post-stack multi-attribute fault system description technique effectively characterizes fractured reservoirs and determines high-quality target areas. This approach holds promise for broader application in the exploration and development of other similar buried hill oil and gas reservoirs.

Keywords deep-water area; buried-hill; sub-faults; fracture prediction; multi-scale

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.06.067

0 引言

南海北部深水区作为一个大型深水含油气盆地,已被证明蕴含巨大的勘探潜力^[1]。深水区的潜山油气勘探已经成为该区域油气勘探的一个重要方向。位于白云凹陷东的深层潜山受风化淋滤和构造抬升等因素的影响,潜山内发育有横向变化快、类型多样的裂缝。受潜山内幕构造作用和成岩作用的影响,潜山断裂发育区的裂缝分布广泛,多数以应力释放后发生断裂的不连续面形式存在。潜山岩体受应力作用而产生位移、形变甚至破裂等复杂现象造就了裂缝型储层多种多样的赋存形式。由于储层裂缝成因的复杂性、裂缝大小的多尺度性、裂缝形态的多样性、裂缝充填物的多类型以及岩性变化造成的多解性等^[2-3]。而且,潜山储层的地震响应特征表现为杂乱反射、弱反射等特点,增加了储层预测的难度。由单一的技术手段对目标裂缝型储层进行描述时,难以准确评价储层的裂缝发育特征,需采取多参数进行综合裂缝储层的预测,综合多尺度、多信息资料开展综合研究^[4],包括地质、测井

和地震三种不同尺度的资料。

根据地质成因及发育规律,断层发育区及构造褶皱区极易形成裂缝发育区,通常把断层、裂缝作为整体进行研究,称为“断缝体”^[5]。利用地震数据进行裂缝性储层描述,主要包括利用叠后地震属性对断层、微断裂进行描述和叠前各向异性参数反演裂缝预测技术^[6]。在叠前各向异性反演中,需要有带方位信息的叠前道集,且方位角较宽的OVT道集最适合^[7]。而利用叠后地震数据主要是通过提取得到的不同地震属性,对断层、亚断层和微断裂的发育规律进行描述。研究表明,根据地震数据的分辨率高低与断裂、微断裂、裂缝目标体的尺度大小,可以形成分尺度、分级预测技术^[8]。

苏朝光等(2002)运用相干分析技术对泥岩微断裂进行了综合描述^[9]。蔡涵鹏等(2016)利用一种基于非线性变时窗的相干算法对地层细微不连续进行了较好的检测^[10]。由于叠后地震数据的分辨率限制,得到的相干属性体对于断裂刻画不够清晰,可以采用近年来发展的断层自动提取技术(AFE)进行相干增加处理,提高断裂体刻画的精度,并可用于对中等尺度的

微断裂进行描述。陈光俊等(2009)利用AFE技术对实际工区的断裂系统进行了细致地刻画^[11]。Dorn et al. (2005)、张军林等(2013)通过采用AFE技术与传统方法相比,其断层解释结果更加准确精细^[12-13]。Qi et al.(2019)采用AFE技术获得了信噪比高并且更加准确的断裂识别结果^[14]。韩勇等(2020)提出AFE技术能够在相干技术的基础上对小断裂的展布进行较好的刻画^[15]。Gao et al. (2013, 2014)和Di et al. (2014)利用梯度曲率属性对小断层进行了有效地识别^[16-18]。张晶玉等(2021)研究了基于曲率算法的储层不连续性特征的识别方法,通过模型正演分析发现曲率属性对于砂体之间不连续性特征具有较高的检测精度^[19]。李维等(2022)通过基于横、纵向组合卡尔曼技术,研究了最大正、负曲率属性与断层的开启性^[20]。Hale et al. (2013)基于相似系数提出了最大似然属性,指出最大似然属性优势在判断断面表征和断层组合,在实际生产中得到了较好的效果^[21]。马德波等(2018)研究了最大似然体在识别断裂中的效果,利用最大似然属性对走滑断裂进行精准识别,提高了断裂内部结构的预测准确度^[22]。于娅等(2019)提出倾角中值滤波技术,对原始地震数据突出断裂信息后提取最大似然属性,精准识别了微断裂^[23]。甄宗玉等(2020)利用最大似然属性对被特定反射系数压制后的河道砂体进行微断裂识别,取得了理想的效果^[24]。

因此,为了解决潜山油气藏储层受构造及风化作用影响形成杂乱反射、弱反射特征,裂缝性储层预测难度大的问题。从叠后地震数据出发,充分利用叠后属性进行多属性分析,形成了一套分尺度叠后地震潜山储层预测方法及技术流程。选用不同的几何类属性及其组合可以对目标区的断裂系统进行精细描述,特别是对于微断裂发育区的刻画。最后,利用深水海上潜山油气藏储层目标区数据进行了应用研究,完成断层解释、本征值相干属性、AFE增强相干属性、曲率属性和最大似然属性的叠后多属性综合解释,实现了对潜山断裂发育区的描述。

1 方法原理及技术流程

利用叠后地震数据进行潜山油气藏裂缝性储层的断裂描述,主要是利用地震数据的叠后几何类属性。叠后属性进行中小尺度的亚断层、微断裂描述,主要选取地震几何类属性,包括方差体、相干类、和曲率类,以及蚂蚁体和最大似然体等。相干类属性具有对断层断点变化敏感的特点,能快速地找到亚断层发育

带,准确的识别较大尺度的亚断层发育特征。微断裂发育受构造的影响较大,特别是在地层的褶皱部位易形成微断裂发育区^[25]。微断裂作为断裂的小尺度体,利用叠后地震属性进行刻画,主要包括曲率、蚂蚁体和最大似然体属性。本文主要选用本征值相干属性、曲率和最大似然体三种属性进行断裂描述,并采用AFE增强技术进行属性的优化处理。为了论文的完整性,下面分别对其方法原理进行简述。

1.1 本征值相干

相干属性主要是用于描述关于相邻道之间相似性的一种属性,通过地震道空间组合反映多点、多道、多线的信息,用来说明断裂的横向不连续性,可以在三维空间对断裂进行描述^[26]。相干属性计算是通过计算地震数据波形之间的相似性,从而得到地震道数据的相似度属性。本征值相干是通过计算地震数据体的本征值获得的,对于地震三维数据体,取相邻的 J 道 N 个采样点数据集 $N \times J$,构成矩阵 $D_{N \times J}$ 。

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

该矩阵对应的协方差矩阵表示如:

$$C_{J \times J} = D_{N \times J}^T D_{N \times J} = \sum_{n=1}^N d_n d_n^T = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N d_{1n} d_{1n} & \sum_{n=1}^N d_{1n} d_{2n} & \cdots & \sum_{n=1}^N d_{1n} d_{Jn} \\ \sum_{n=1}^N d_{2n} d_{1n} & \sum_{n=1}^N d_{2n} d_{2n} & \cdots & \sum_{n=1}^N d_{2n} d_{Jn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{n=1}^N d_{Jn} d_{1n} & \sum_{n=1}^N d_{Jn} d_{2n} & \cdots & \sum_{n=1}^N d_{Jn} d_{Jn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

该协方差矩阵是一个对称的、半正定矩阵,其所有的本征值大于或等于0。通过计算协方差矩阵的本征值和本征向量得到本征值相干属性:

$$C = \frac{\lambda_{\max}}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (3)$$

其中, $\lambda_i (1,2,3 \dots n)$ 为协方差矩阵的特征值, λ_{\max} 为最大的特征值。

1.2 曲率

曲率属性主要反映地层的弯曲程度,也可以间接地对断裂进行描述。曲率是曲线上单位弧长段上切线旋转角度大小的极值,可描述曲线上任意一点的弯曲程度,利用过该点内切圆半径的倒数来表示^[27]。因此,通过计算三维地震数据的曲率,可以描述地震数

据体的几何形态特征。设曲线函数为 $y = f(x)$ ，曲率 k 的导数形式：

$$k = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

式中， x 、 y 分别为坐标轴， ρ 为曲率半径，曲率越大，弯曲程度越大。三维空间的两个正交平面相交于曲线，产生最大曲率、最小曲率、走向曲率、倾角曲率等。为了计算曲面上一点的曲率，需要拟合局部二次曲面：

$$z(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (5)$$

式中， x 、 y 为曲面在平面的投影坐标， a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 为方程的系数， $a = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$ ， $b = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$ ， $c = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$ ，

$d = \frac{\partial z}{\partial x}$ ， $e = \frac{\partial z}{\partial y}$ ， f 为采样点的值， z 为深度。

在无限个法线曲率中，绝对值最大的为最大曲率 k_{\max} ，与其正交的为最小曲率 k_{\min} ，是对界面上某一点最大、最小弯曲程度的测量，这两种属性体对识别和描述断裂的几何形态行之有效，其计算公式可以写成：

$$k_{\max} = k_m + \sqrt{k_m^2 - k_m} \quad (6)$$

$$k_{\min} = k_m - \sqrt{k_m^2 - k_m} \quad (7)$$

而所有法线曲率中最大正值对应的曲率为最大正曲率 k_{pos} ，最小负值对应的曲率为最小负曲率 k_{neg} ，最大正曲率突出曲面上任一点处的正曲率值，即突出显示曲面上的正向构造；最小负曲率则突出曲面上任一点处的负曲率值，即突出显示曲面上的负向构造，其计算公式可以写成：

$$k_{\text{pos}} = (a + b) + \sqrt{(a - b)^2 + c^2} \quad (8)$$

$$k_{\text{neg}} = (a + b) - \sqrt{(a - b)^2 + c^2} \quad (9)$$

1.3 最大似然体

最大似然体属性算法是基于相似系数提出的，其原理是将原始地震数据沿着一组倾向、倾角和走向，计算每一点最低的相似度，使得最终的最大似然数据体更接近裂缝原貌，相似性又通过构造导向平滑得到相似度属性。对地质体沿反射界面不同方向变化率的估计是相似性计算的基础，所以进行最大似然属性计算的前提是先估计沿反射界面不同方向的反射斜率^[21]。定义似然属性为：

$$\text{likelihood}(x, y, \tau) = 1 - C(x, y, \tau)^n \quad (10)$$

其中， $C(x, y, \tau)$ 为分析点的相似系数， x 、 y 为分析点

的坐标； τ 为分析点的时间；指数 n 扩大了相似系数高值与低值之间的差异性。

假设已知断层的倾角和倾向，可以采用沿断层倾向和倾角的三维倾斜中心时窗计算相似系数，假设断层倾向扫描范围为 $[\min, \max]$ ，扫描间隔为 Δ ，断层倾角 θ 扫描范围为 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ ，扫描间隔为 $\Delta\theta$ 。对于某个采样点，分别对每个扫描的倾角和倾向采用倾斜中心时窗计算其似然属性，再通过对比求取其最大值，所以最大似然属性可表示如：

$$\text{Maximum likelihood}(x, y, \tau) = [1 - C(x, y, \tau, \theta)]^n \quad (11)$$

如式 11 所示，最大似然属性的指数 n 数值范围在 0 到 10 之间，通常可以把其设定为 8。从上述公式可知，最大似然属性是对地震数据的相似系数进行了一定程度的放大，地震同相轴越连续，相似程度越高，说明断层发育的概率越小，即最大似然属性值越小；反之，地震同相轴连续性越差，相似程度越低，说明断层发育的概率越大，即最大似然属性值也越大^[28]。

1.4 AFE 相干增强

AFE 相干加强属性是相对于相干属性进行线性增强处理，用线性滤波去除数据中的非构造异常，保留因构造造成的相干体异常，利用断层增强技术增强每一个水平切片的线性特征，从而增强断层的平面特征。

如果对叠加剖面上第 j 道做相干加强，则以该道为中心，两侧各取 N 道并求 $2N + 1$ 道的平均值 $m_j(i)$ 作为该道的模型道，将做相干加强的第 j 道与模型道按照一定比例进行混波，表示如：

$$\tilde{a}_j(i) = a_j(i) + K \times m_j(i) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

其中， K 为混波百分比； $a_j(i)$ 为混波前第 j 道的第 i 个振幅； $\tilde{a}_j(i)$ 为混波后的振幅，为使混波后地震道 $\tilde{a}_j(i)$ 接近模型道 $m_j(i)$ ，选用权系数对混波 $W_j^i(i)$ 道进行加权，让加权后的地震道与模型道残差达到最小。 $W_j^i(i)$ 的求取可以利用最小二乘原理求极值求出，表示如：

$$W_j^i(i) = \frac{\sum_{\tau=i-N}^{i+N} \tilde{a}_j(\tau) \times \frac{m_j(\tau)}{\sum_{\tau=1-N}^{1+N} (\tau)^2}}{\sum_{\tau=i-N}^{i+N} (\tau)^2} \quad (13)$$

其中， $W_j^i(i)$ 为相关系数，分子为混波道的自相关，分母为混波道与模型道的互相关， N 为相关道数，因此有：

$$W_j^i(i) = \frac{\sum_{\tau=i-N}^{i+N} [a_j(i) + m_j(i)] \times m_j(i)}{\sum_{\tau=i-N}^{i+N} [a_j(i) + m_j(i)]^2} \quad (14)$$

为保持 $W_j^i(i)$ 的稳定性，对其进行限幅和平滑处理。对混波后的地震道进行加权以加强有效波削弱干

扰波，表示成：

$$\widehat{a}_j(i) = W_j^i(i) \times \widetilde{a}_j(i) \quad (15)$$

为了使相干加强后的地震道保留被处理道的特征，可将相干加强后得到的结果按比例加到原始地震数据中，最终得到AFE增强处理的属性体。

1.5 技术流程

如图 1 所示，本文建立了利用叠后地震数据及不同属性进行断裂描述的技术流程。首先，利用地震数据进行人工解释得到断层。由于是直接利用叠后地震数据解释得到的断层，因此断层尺度较大，与地震数据本身的分辨率相当，为地震波长的四分之一。其次，亚断层需要利用叠后地震属性体进行描述。亚断层是由 Lohr et al. (2008)^[29]首次提出，其尺度低于地震数据分辨率，大于微断裂，不能直接在二维或三维地震剖面解释，主要通过计算地震数据的相干属性进行亚断层的描述。常用的 C3 相干算法计算得到的结果分辨率不高，本文主要采用本征值相干计算方法提取叠后相干属性体，并利用断层自动提取方法进行相干增强处理，提高相干属性对亚断层刻画的精度。最后，利用叠后曲率属性和最大似然属性对微断裂发育区进行预测^[30]。利用叠后地震数据进行微断裂预测，其结果是定性的，主要反映的是与构造(断层、背斜)相关的微断裂，可以很好地对储层的微断裂发育区进行解释。因此，将断层、亚断层和微断裂三种不同尺度大小的断裂分三个级别进行描述，最后将三个尺度的结果进行叠合，在此基础上可以有效明确储层的断裂发育区。

综上所述，利用叠后地震数据体进行储层的微断裂预测的技术流程(图 2)，可以归纳为以下步骤：

- i) 利用叠后地震剖面，进行目标储层断层解释；
- ii) 叠后数据倾角控制增强和滤波处理、属性参数

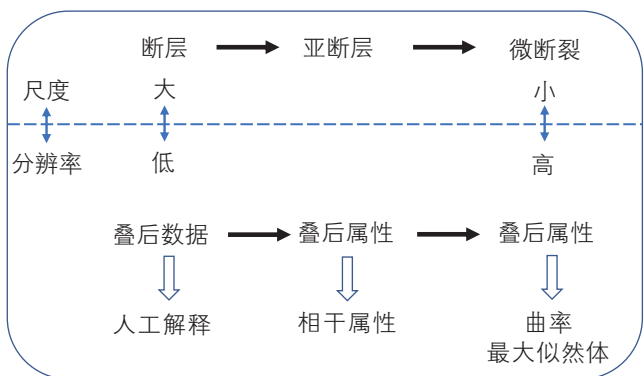


图 1 利用叠后地震属性进行储层断裂描述方法示意图
Fig. 1 The schematic diagram of fault and fracture description by using the post-stack seismic attributes

优选；

- iii) 提取本征值相干属性；
- iv) AFE 相干增强处理；
- v) 曲率、最大似然体属性提取；
- vi) 多属性综合解释目标区储层断裂发育规律。

2 实际数据应用

本文利用上述的叠后地震数据体进行微断裂预测方法及技术流程，对实际潜山微断裂预测开展了应用研究。盆地内的潜山油气藏勘探作为研究区的一个重要方向，并已在附近区域的潜山储层有所发现。研究区位于南海北部深水区白云凹陷东隆起构造带，具有很好的油气成藏条件，并且在潜山上部层段发现了多个油气田。图 3 为研究区内过井的叠后地震剖面，潜山上覆的沉积地层及其与下伏的潜山界面成像清楚，潜山内幕地震响应较复杂，且潜山顶部有杂乱反射、弱反射地震相特征。因此，对于研究区的潜山内幕的微断裂预测是其有利目标区选取的关键。

2.1 断层解释

对于研究区的潜山微断裂预测，我们采用了本文提出的叠后地震属性微断裂预测方法及流程。首先，利用叠后三维地震数据开展了潜山目标区的断层解释，将断层解释结果与潜山顶界面的构造图进行叠合分析，掌握了研究区潜山的构造形态及其潜山内幕断层的发展规律。图 4a 为潜山顶界面及其内幕断层的解释结果剖面图。图中展示了潜山顶面发育正断层控制的箕状半地堑、地堑、沉积地层，潜山内幕发育有早期逆冲

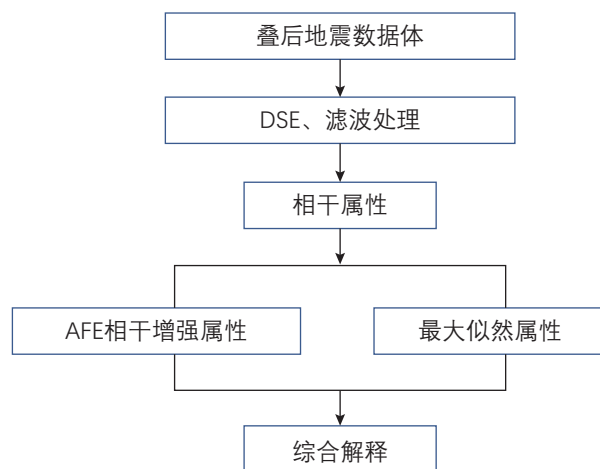


图 2 利用叠后地震属性进行储层断裂预测技术流程图
Fig. 2 The technical flow chart of fault and fracture prediction by using the post-stack seismic attributes

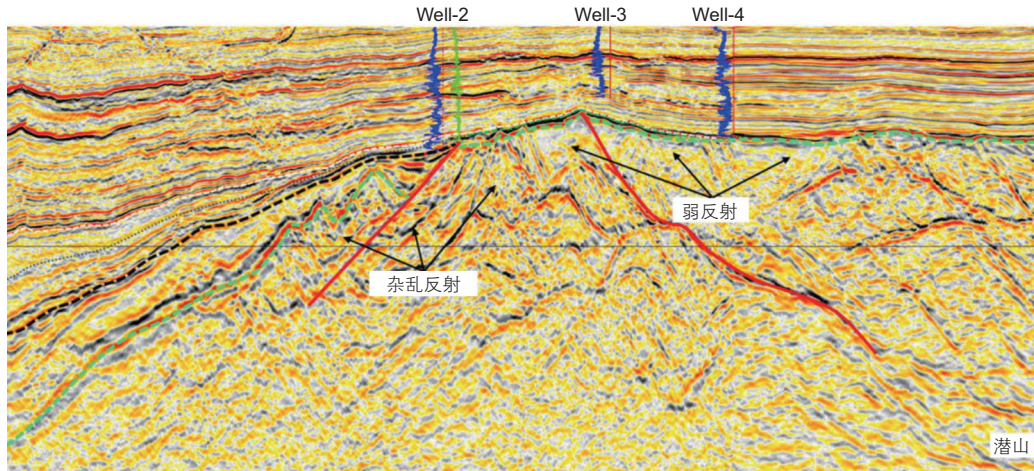
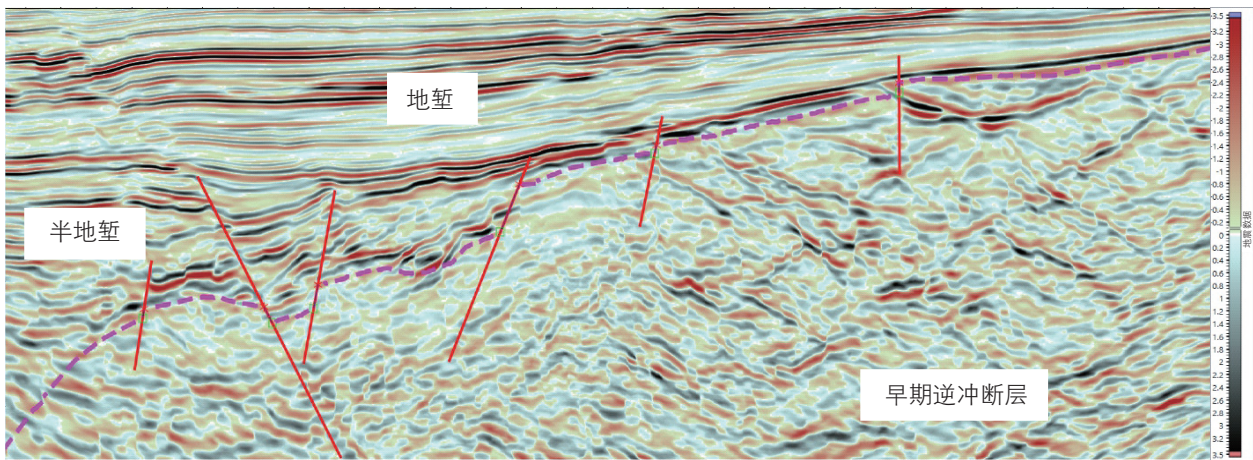
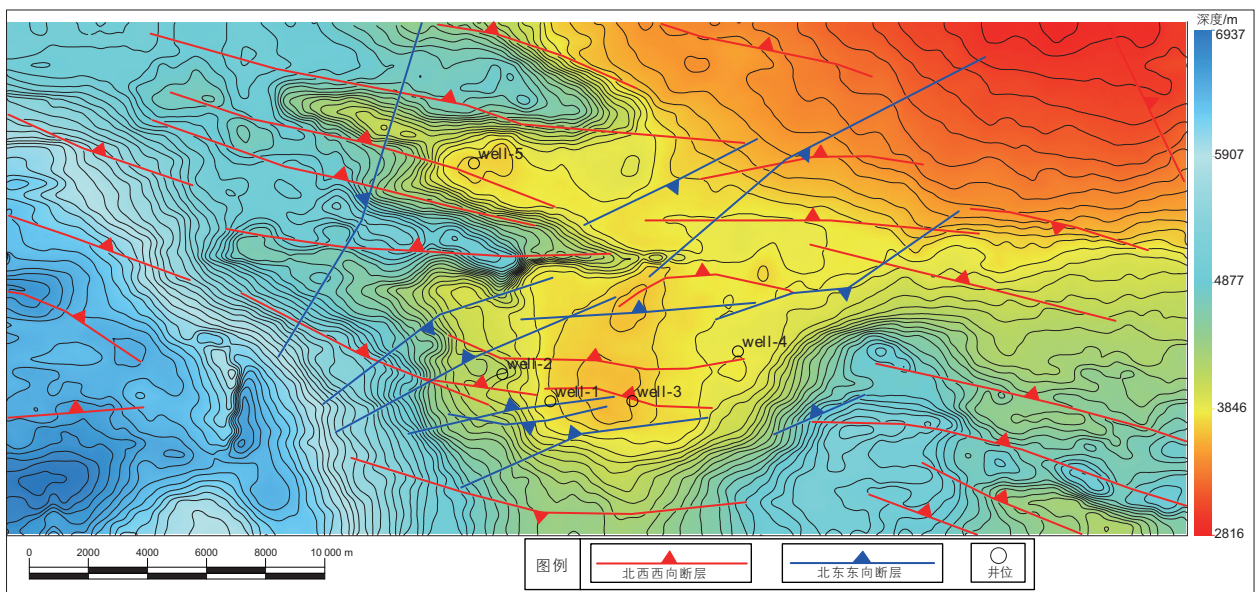


图 3 潜山目标研究区过井地震剖面
Fig. 3 Cross well seismic profile in the study area of the buried hill



(a) 断层解释地震剖面图



(b) 断层平面分布图

图 4 潜山储层断层解释地震剖面及平面展布图
Fig. 4 Seismic profile and plane layout of buried hill reservoir fault interpretation

大断层，以及潜山顶界面断层发育形成地堑及半地堑等特征，上覆地堑的斜坡上倾部位、深部逆冲断裂密集发育的地区是潜山风化程度相对较高的区域。图 4b 为潜山内幕断层与顶界面的构造图。研究区内的潜山形态为从东北向西南方向发展的“鼻状”构造，形成的两个构造高部位与盆地凹陷相接处是油气成藏有利区。潜山内幕的断层主要发育两套逆冲断层(如图 4a 所示)，一组是北西西向，该组断层在研究区比较发育，另一组是北东东向断层。图 4b 的断层平面展布特征表明两组断层具有走滑断层特征。

2.2 叠后属性

在利用叠后地震数据提取地震属性前，先对其进行了倾角控制增强和滤波处理，其目的是为了降低地震数据中的噪音，提高地震数据波组特征和信噪比。

在倾角控制增强处理中，选取时间孔径参数为 11、空间孔径参数为 5 进行了处理，其结果如图 5 所示。处理前后的地震数据剖面噪声得到有效去除，断层更容易识别，如图中红色箭头所示。在处理后的地震数据体上，提取了本征值相干属性。相干属性计算的参数主要进行了影响地层产状、影响纵向延展性和影响横向分辨率三个参数的分析。通过测试地层倾角、空间孔径及时间孔径等敏感参数。消除地层倾角影响，断层断点更为清晰，得到对亚断层能够很好刻画的本征值相干属性。如图 6 所示为反映潜山内幕破碎，断裂系统相对复杂。

在本征值相干属性体上，采用 AFE 相干增强属性分析，其主要目的是在相干基础上进行成像加强处理，包括线性增强、倾角增强和断层增强三种方法。图 7

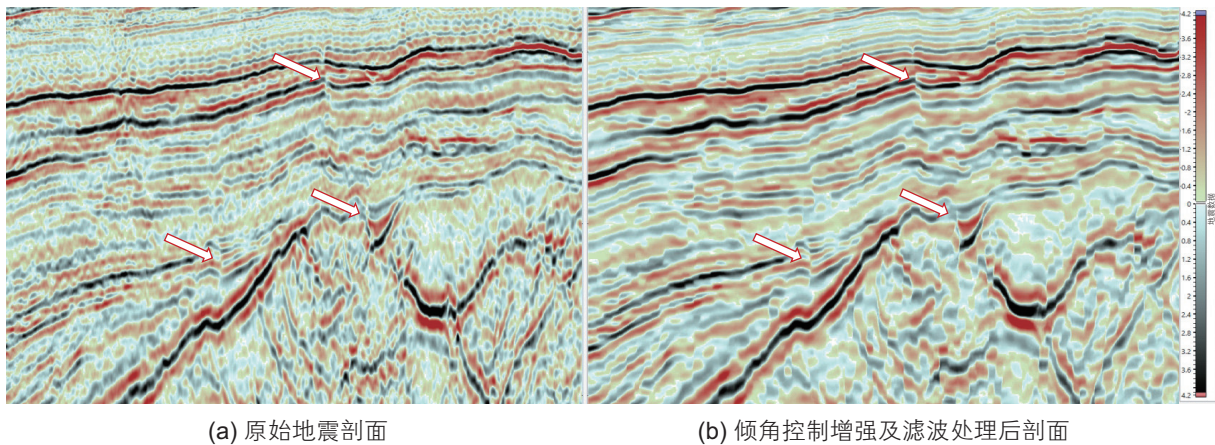


图 5 倾角控制增强及滤波处理前后地震剖面对比图

Fig. 5 Comparison of seismic profiles before and after dip control enhancement and filtering

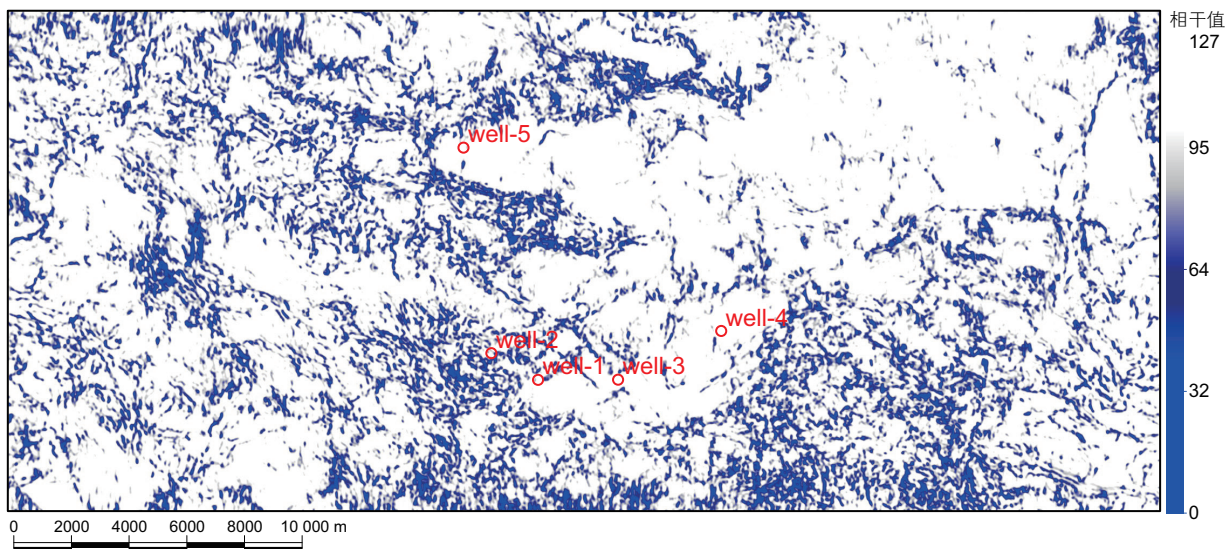


图 6 提取的本征值相干属性平面图

Fig. 6 Plane map of the Eigenvalue coherent attribute

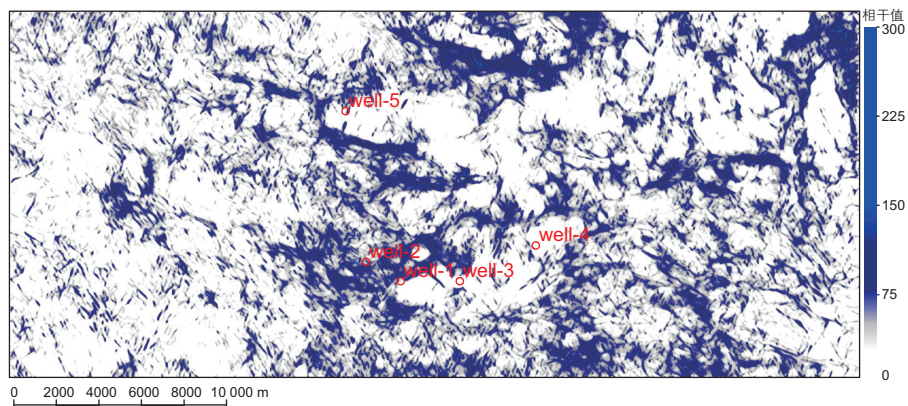
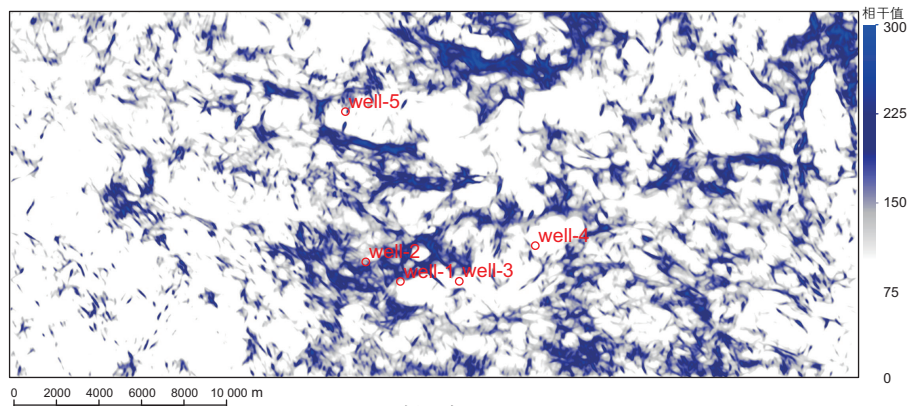
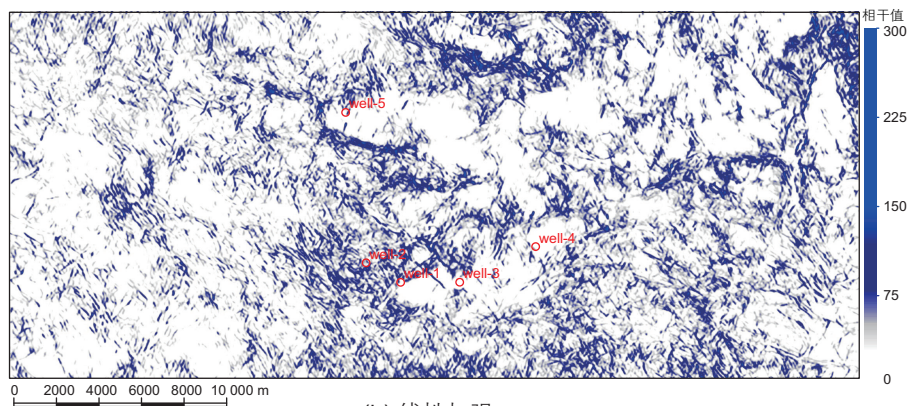
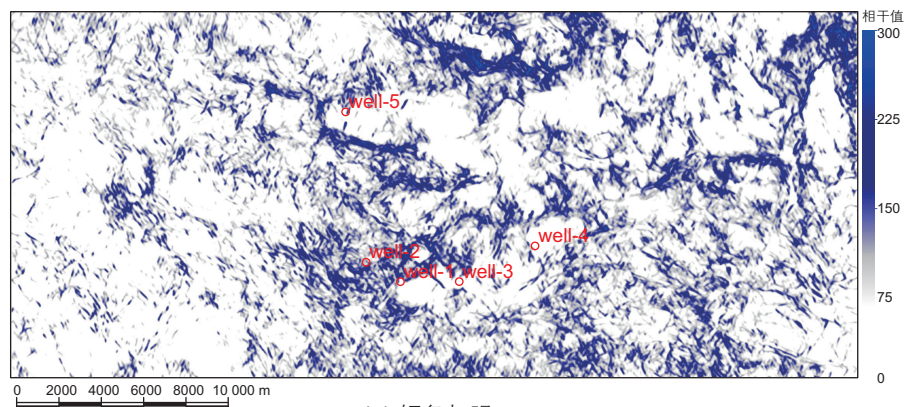


图7 断层自动提取相干增强属性对比图

Fig. 7 Comparison of Automatic Fault Extraction (AFE) coherent enhanced attributes

对比了不同增强方法得到的断层自动提取相干增强属性平面图。图7的线性增强可以把断层和岩性特征表现出来,断层增强与倾角加强可以反映不同的发育区。断层增强平面属性对于小尺度断裂预测效果最佳,能清楚的展示出不同的发育区,在发育带附近,图中蓝色强的为断层,白色弱的为发育区,颜色越偏深表示出现中小尺度断裂的概率越大,所以利用相干加强属性AFE去预测中小尺度的断裂,效果最好的是倾角增强和线性增强平面属性。相干加强AFE属性较常规三代相干属性精度更高,断层断点及平面变化细节更为突出。如图7d所示,将线性增强与断层增强进行融合,结果能够更清晰地刻画亚断层的平面展布规律。

最后,对于描述潜山内幕微断裂发育情况,选取

了曲率属性和最大似然体属性进行对比分析。曲率属性的提取主要考虑地层倾角和方位角信息,没有考虑岩性和地层压力的影响。通过参数对比分析优选分辨率最高的时窗参数进行曲率属性计算。如图8a所示,最大正曲率属性平面图中色棒上红色为绝对值较大的曲率值,白色为绝对值较小的曲率值。如图8b所示,最大负曲率属性平面图中颜色越深,出现中等尺度断裂的概率越大,色棒上红色为绝对值较大的曲率值,白色为绝对值较小的曲率值。将不同曲率属性结合起来综合分析,可以观察到较大的明显断层、较小的微断裂线性构造和解释。

对最大似然属性测试分析,将原始地震数据沿走向和倾角计算每一点的相似度,最终的最大似然属性

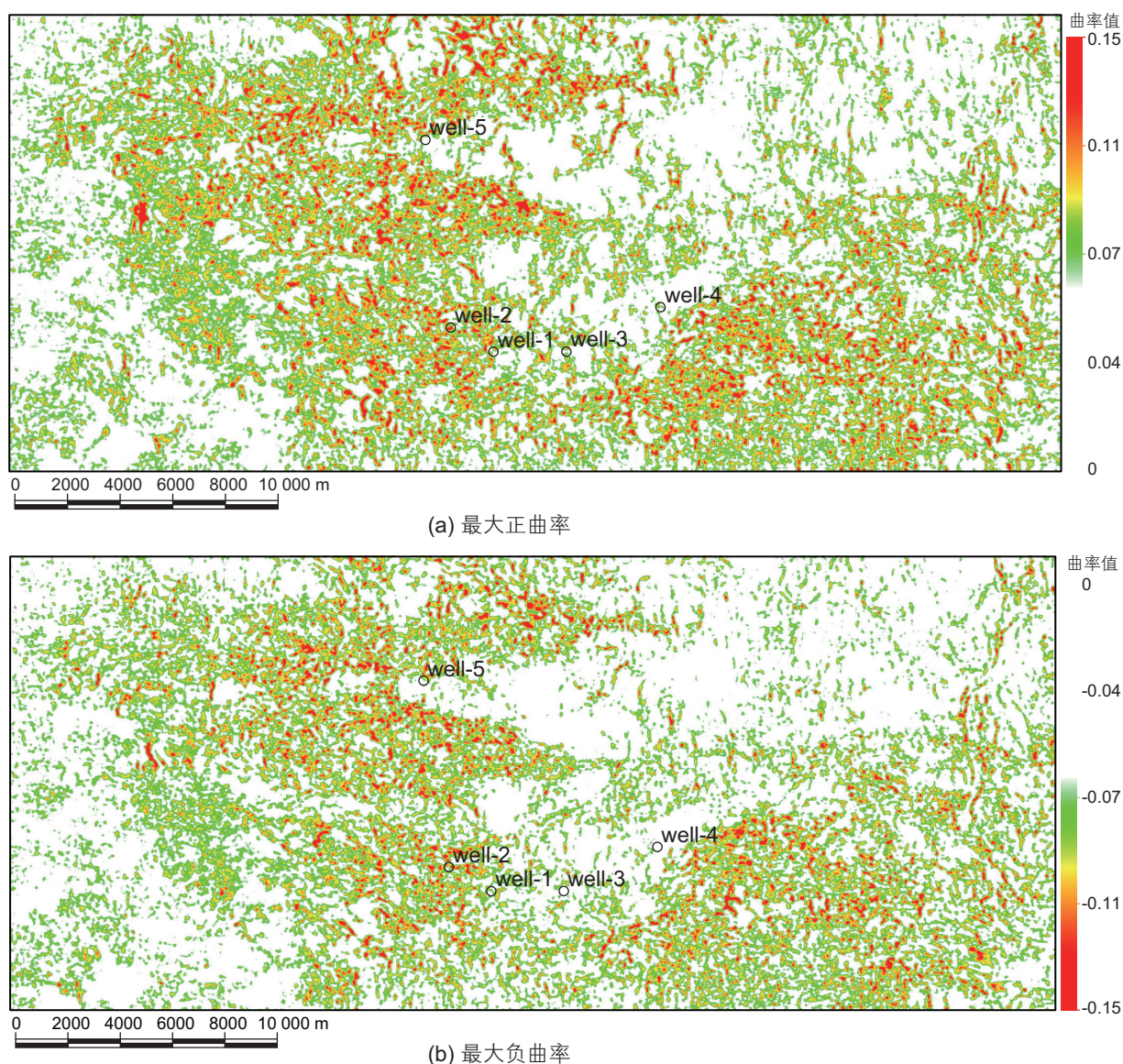


图8 提取的曲率属性平面图

Fig. 8 Plane maps of the computed curvature attribute

体更加准确描述断裂的发育规律, 并通过与薄断层最大似然属性对比, 发现薄断层最大似然的剖面对微断裂的预测效果更好, 断裂破碎带及内幕细节特征刻画明显(图9、图10)。选取0.4作为属性阈值门限, 对比分析最大似然属性与地震剖面的对比(图10), 最大似然属性在该区对微断裂预测较为准确; 潜山内预测的微断裂发育。

2.3 综合解释

通过对比分析人工解释的断层、相干属性、曲率属性和最大似然属性的结果(图4、图7、图8、图9), 可以发现对于潜山储层内幕的断裂刻画, 反映了不同尺度的特征。最后, 我们将三种尺度的属性进行叠合,

以此来分析潜山内幕的断层发育规律。选取了人工解释的断层、AFE增强的本征值相干属性和最大似然属性三种属性进行融合。如图11所示, 提取了反映潜山内幕的沿层平面属性, 图中用不同的颜色显示不同的属性。潜山内幕发育两组早期的走滑断层, 一组为北西西向, 图中的红色断层; 另一组为北东东向, 图中的蓝色断层。相干属性反映的是潜山内幕发育的亚断层, 其主要受深层走滑断层的影响, 其发育特征及规律表现为与走滑断层伴生且相互垂直。最大似然属性对微断裂刻画较为准确, 潜山内幕的微断裂走向与北西西向断层展布较为一致, 且分布在潜山的翼部, 与亚断层发育相关, 在图11中用Rainbow色标显示, 其红黄显示微断裂发育。同时, 结合图4b的潜山构造

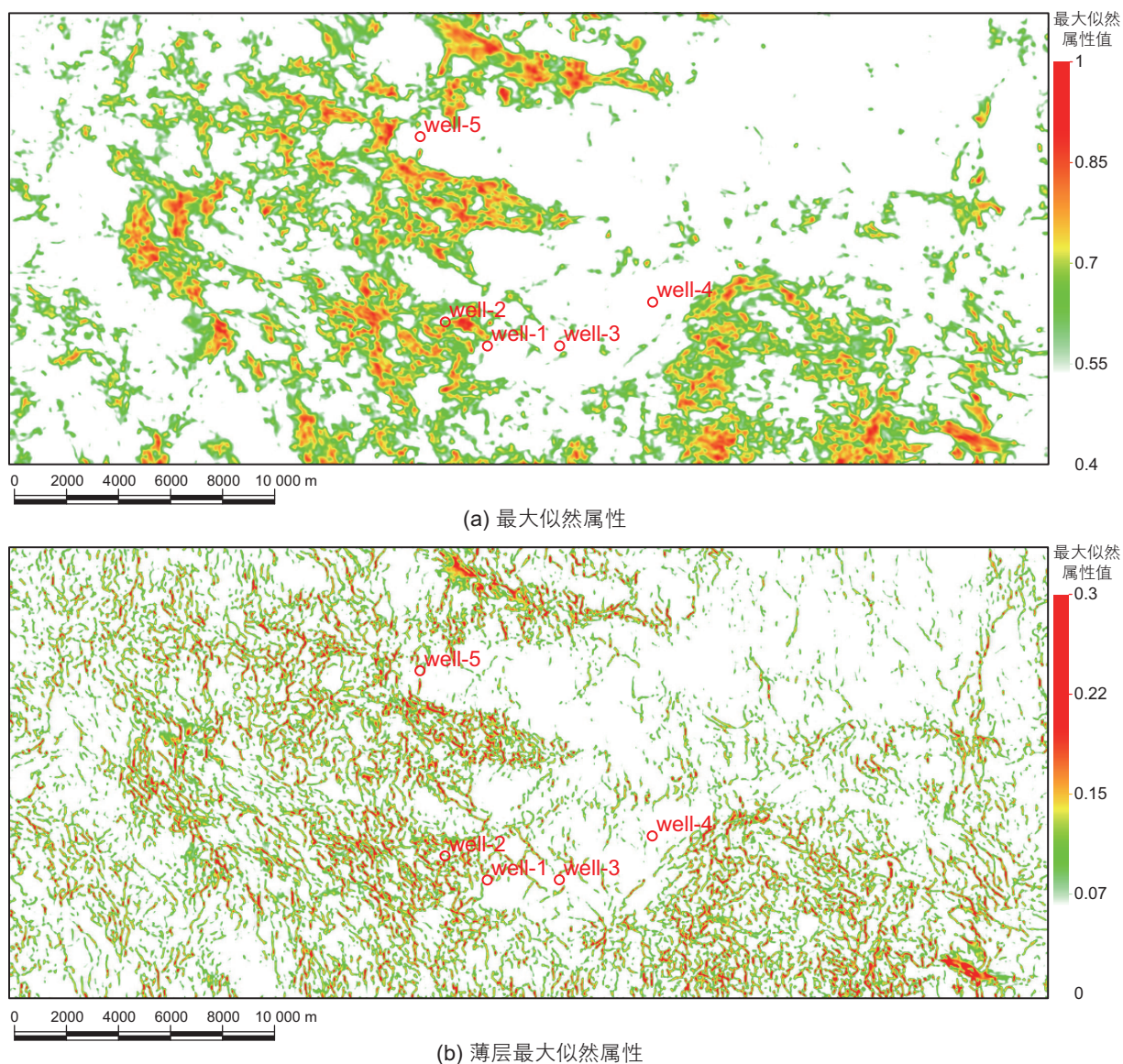


图9 提取的最大似然属性平面图

Fig. 9 Plane map of the computed maximum likelihood attribute

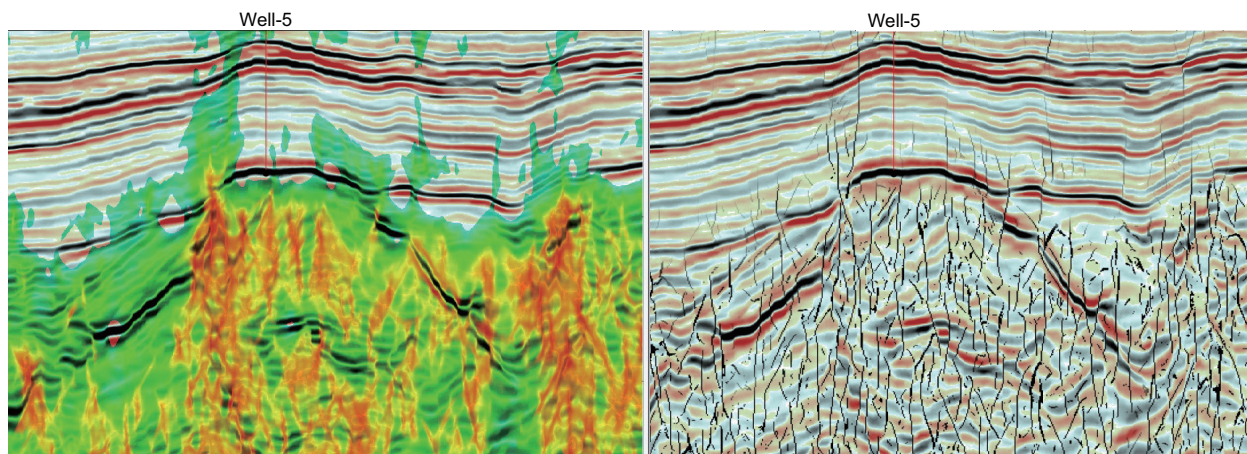


图 10 最大似然属性与地震剖面叠合对比图

Fig. 10 Comparison of the maximum likelihood and thinned fault maximum likelihood with seismic sections

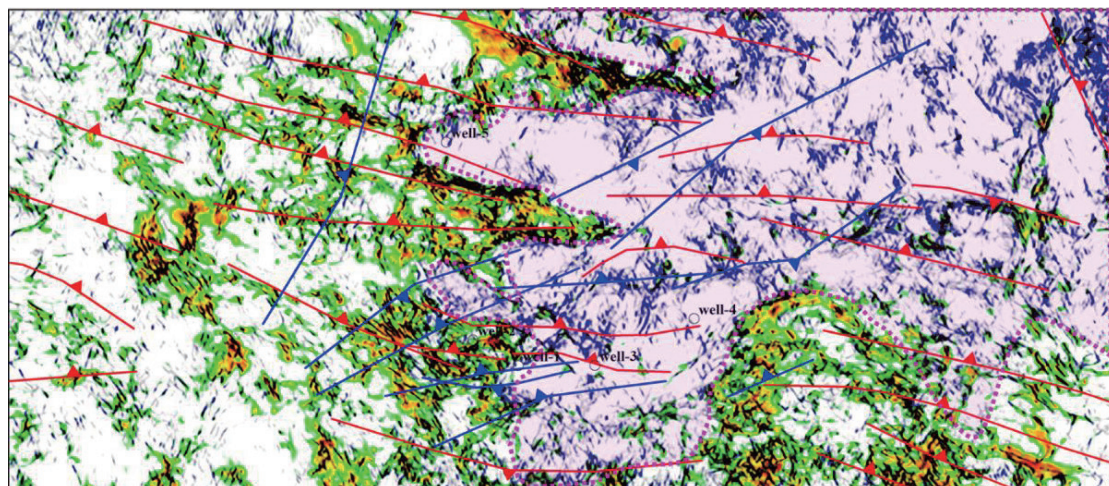


图 11 断层、相干和最大似然属性综合平面图

Fig. 11 Comprehensive plane diagram of fault, coherence attribute and maximum likelihood attribute

图，在图 11 中用紫色点线圈出了潜山高部位范围，对比可以发现在潜山翼部断层、亚断层和微断裂发育，且亚断层与微断裂与断层的发育相关。而在潜山构造主体高部位的内幕，走滑断层及亚断层发育，微断裂不发育。

3 结论

针对潜山储层的断裂发育规律刻画，形成了利用叠后地震数据及多属性相结合的分尺度描述方法。根据地震数据分辨率高低，实现了潜山储层的断层、亚断层和微断裂的三个尺度的描述，采用断层解释、本征值相干属性、曲率属性和最大似然体属性。实际数据应用结果表明，本文提出的叠后多属性断裂分尺度

描述方法可以有效地进行潜山油气藏储层的断裂发育规律描述。在对亚断层描述中，主要利用了本征值相干属性，并且利用 AFE 相干增强，其对亚断层的刻画较清晰准确。而通过对比曲率属性和最大似然属性对微断裂的预测，发现薄层最大似然属性对微断裂刻画更好。

由于实际地震数据为海上常规的窄方位拖缆叠后地震数据，所以采用叠后多属性分析进行潜山储层内幕的断裂系统进行刻画。潜山储层受构造的影响，其断裂发育的平面展布特征明显与潜山构造具有很好的相关性。在潜山高部位微断裂不发育，其原因可能与岩性有关，更易发育更小尺度的裂缝。因此，对于潜山储层的裂缝预测需要开展基于叠前方位属性反演研究，进一步落实潜山储层裂缝发育的有利目标区。

参考文献

- [1] 史运华, 刘道理, 张星宇, 等. 基于多构造属性联合约束的速度建模方法——以珠江口盆地恩平凹陷为例[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(04): 85–90. [SHI Y H, LIU D L, ZHANG X Y, et al. Velocity modeling under joint constraint of multiple structural attributes: a case study of Enping Sag in Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(4): 85–90.]
- [2] 吕文雅, 苗凤彬, 张本键, 等. 四川盆地剑阁地区须家河组致密砾岩储层微断裂特征及对天然气产能的影响[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(03): 484–491+557. [LYU W Y, MIAO F B, ZHANG B J, et al. Fracture characteristics and their influence on natural gas production: A case study of the tight conglomerate reservoir in the Upper Triassic Xujiahe Formation in Jian'ge area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 484–491+557.]
- [3] 吕文雅, 曾联波, 陈双全, 等. 致密低渗透砂岩储层多尺度天然微断裂表征方法[J]. 地质论评, 2021, 67(2): 543–556. [LYU W Y, ZENG L B, CHEN S Q, et al. Characterization methods of multi-scale natural fractures in tight and low-permeability sandstone reservoirs[J]. Geological Review, 2021, 67(2): 543–555.]
- [4] CHEN S Q, ZENG L B, HUANG P, et al. The application study on the multi-scales integrated prediction method to fractured reservoir description[J]. Applied Geophysics, 2016, 13(1): 80–92.
- [5] 何发岐, 梁承春, 陆骋, 等. 鄂尔多斯盆地南缘过渡带致密–低渗油藏断缝体的识别与描述[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(04): 710–718. [HE F Q, LIANG C C, LU C, et al. Identification and description of fault-fracture bodies in tight and low permeability reservoirs in transitional zone at the south margin of Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(04): 710–718.]
- [6] 刘俊州, 韩磊, 时磊, 等. 致密砂岩储层多尺度裂缝地震预测技术——以川西XC地区为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(03): 747–754. [LIU J Z, HAN L, SHI L, et al. Seismic prediction of tight sandstone reservoir fractures in XC area, western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(03): 747–754.]
- [7] 印兴耀, 张洪学, 宗兆云. OVT数据域三维地震资料解释技术研究现状与进展[J]. 石油物探, 2018, 57(02): 155–178. [YIN X Y, ZHANG H X, ZONG Z Y. Research status and progress of 5D seismic data interpretation in OVT domain[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(02): 155–178.]
- [8] 潘仁芳, 金吉能. 断层和裂缝尺度识别的地球物理方法探讨[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8(03): 16–18+13. [PAN R F, JIN J N. Geophysical method for recognizing faults and fracture sizes[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2011, 8(03): 16–18+13.]
- [9] 苏朝光, 刘传虎, 王军, 等. 相干分析技术在泥岩微断裂油气藏预测中的应用[J]. 石油物探, 2002, 41(2): 197–201. [SU C G, LIU C H, WANG J, et al. Application of coherence analysis technology in the prediction of fractured shale reservoirs and its effect analysis[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum. 2002, 41(2): 197–201.]
- [10] 蔡涵鹏, 胡光岷, 贺振华, 等. 基于非线性变时窗相干算法的不连续性检测方法[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(2): 371–376. [CAI H P, HU G M, HE Z H, et al. Subtle discontinuity detection with nonlinear variable-time window coherency algorithm[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(2): 371–376.]
- [11] 陈光俊, 伊万顺, 许建明, 等. 断层自动拾取技术在大布苏地区地震资料解释中的应用[J]. 石油物探, 2009, 48(5): 521–523+530+18. [CHEN G J, YI W S, XV J M, et al. Application of automatic fault extraction technique on seismic data interpretation in Dabusu area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2009, 48(5): 521–523+530+18.]
- [12] DORN G, JAMES H, DOPKIN D, et al. Automatic fault extraction in 3D seismic interpretation[C]. 67th EAGE Conference Exhibition European Association of Geoscientists Engineers, 2005, 1–4.
- [13] 张军林, 田世澄, 郑多明, 等. 裂缝型储层地震属性预测方法研究与应用[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(03): 79–84+166. [ZHANG J L, TIAN S C, ZHENG D M, et al. Seismic attribute prediction method for fractured reservoirs[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(03): 79–84+166.]
- [14] QI J, LYU B, ALALI A, et al. Image processing of seismic attributes for automatic fault extraction[J]. Geophysics, 2019, 84(1): 25–37.
- [15] 韩勇, 徐浩. 断裂检测技术在塔河于奇中三维的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2020, 46(6): 104–105+124. [HAN Y, XV H. Application of Fracture Testing Technology in Three Dimension Survey in YUQI, TAHE Oilfield[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2020, 46(6): 104–105+124.]
- [16] GAO D L. Integrating 3D seismic curvature and curvature gradient attributes for fracture characterization: Methodologies and interpretation implications[J]. Geophysics, 2013, 78(2): 21–31.
- [17] GAO J H, YIN X Y, ZONG Z Y. Curvature attribute based on dip scan with eccentric window[C]. Paper presented at the SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2014, 1614–1618.
- [18] DI H B, GAO D L. A new analytical method for azimuthal curvature analysis from 3D seismic data[C]. Paper presented at the SEG Technical Program Expanded Abstracts. Denver, 2014, 1634–1638.

- [19] 张晶玉, 范廷恩, 王海峰. 曲率属性在河流相储层内部不连续性检测中的应用[J]. 物探与化探, 2021, 45(2): 450–457. [ZHANG J Y, FAN T E, WANG H F. Application of curvature attributes to fluvial reservoirs discontinuity detection[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2): 450–457.]
- [20] 李维, 陈刚, 王东学, 等. 利用最大正、负曲率识别准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组甜点段微小断层开启性[J]. 2022, 57(1): 184–193. [LI W, CHEN G, WANG D X, et al. Identification of micro fault opening in sweet-spot member of Lucaogou Formation in Jimusar Sag of Junggar Basin by maximum positive and negative curvature[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(1): 184–193.]
- [21] HALE D. Methods to compute fault images, extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3D seismic images[J]. Geophysics, 2013, 78(2): 33–43.
- [22] 马德波, 赵一民, 张银涛, 等. 最大似然属性在断裂识别中的应用——以塔里木盆地哈拉哈塘地区热瓦普区块奥陶系走滑断裂的识别为例[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(6): 817–825. [MA D B, ZHAO Y M, ZHANG Y T, et al. Application of maximum likelihood attribute to fault identification: A case study of Rewapu block in Halahatang area, Tarim Basin, NW China[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(6): 817–825.]
- [23] 于娅, 边立恩, 王国强, 等. 最大似然法断层识别技术在秦皇岛 28 油田勘探中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(8): 67–72. [YU Y, BIAN L E, WANG G Q, et al. Application of fault recognition technique based on maximum likelihood in exploration of Qinhuangdao 28 oilfield[J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(8): 67–72.]
- [24] 甄宗玉, 郑江峰, 孙佳林, 等. 基于最大似然属性的断层识别方法及应用[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(1): 374–378. [ZHEN Z Y, ZHENG J F, SUN J L, et al. Fault identification method based on the maximum likelihood attribute and its application[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(1): 374–378.]
- [25] 肖红纱, 井翠, 郑健, 等. 长宁地区五峰组底界微断裂识别及对页岩气开发工程的影响[J]. 中国矿业, 2022, 31(05): 171–180. [XIAO H S, JING C, ZHENG J, et al. The identification of micro-faults at the bottom of Wufeng Formation in Changning Area and its influence on shale gas development[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(05): 171–180.]
- [26] 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.
- [27] MARFURT K J, KIRLIN R L, FARMER S L, et al. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm[J]. Geophysics, 1998, 63(4): 1150–1165.
- [28] ZHOU N, LUO L, SHENG G, et al. High Accuracy Insulation Fault Diagnosis Method of Power Equipment Based on Power Maximum Likelihood Estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1291–1299.
- [29] LOHR T, CHARLOTTE M, DAVID C, et al. Prediction of subseismic faults and fractures: Integration of three-dimensional seismic data, three-dimensional retrodeformation, and well data on an example of deformation around an inverted fault. AAPG Bulletin 2008, 92 (4): 473–485.
- [30] 梁志强. 不同尺度裂缝的叠后地震预测技术研究[J]. 石油物探, 2019, 58(05): 766–772. [LIANG Z Q. Poststack seismic prediction techniques for fractures of different scales[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(05): 766–772.]

(编辑 付娟娟)