

秦德文, 刘庆文, 李琴. 基于保边滤波的断层似然属性在西湖凹陷复杂断裂识别中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(5): 91-98.

QIN Dewen, LIU Qingwen, LI Qin. Application of fault likelihood attribute based on edge-preserved filter in complex fault identification of Xihu Sag[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(5): 91-98.

# 基于保边滤波的断层似然属性在西湖凹陷复杂断裂识别中的应用

秦德文, 刘庆文, 李琴

(中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335)

**摘要:** 西湖凹陷中央背斜带 N 构造区油气资源富集, 但地质活动频繁, 断层期次、交切关系复杂, 同时, 靶区地震资料信噪比低, 目的层段反射杂乱, 进一步影响断层精细刻画。本文利用非线性各向异性保边滤波方法去噪, 克服传统线性滤波对断层边缘破坏问题, 兼顾噪音压制与边界信息保护; 通过对每个样点进行断层倾向和倾角扫描, 依次计算相似系数和似然属性, 选取最大的似然属性值作为最终结果, 该方法较传统相干算法可更精细表征断层。实际资料应用表明: 联合非线性各向异性保边滤波去噪与断层似然属性方法能够更好地压制随机噪音、保护断层边界信息, 断层刻画精度更高, 较好地落实了 N 构造区复杂断裂幕次精细刻画。

**关键词:** 断层识别; 非线性各向异性滤波; 边界保护; 噪音压制; 断层似然属性

中图分类号: P744.4; P631.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.133

## 0 引言

N 构造位于西湖凹陷中央背斜带中段, 毗邻生烃中心, 且发育大型三角洲-辫状河道砂体, 油气资源丰富。区域研究表明, 该构造地质活动频繁剧烈, 发育多期断层, 对圈闭构造研究造成困扰。图 1 所示为过靶区 A2 井地震剖面, 该井附近发育 3 条“上正下逆”EW 向断层(红色虚线), H1—H2 段为塑性带, 地震剖面揭示该段以上为正断层, 以下为逆断层, 而靶区构造运动为早期断陷晚期挤压特征, 多表现为“下正上逆”, 两者地质认识不符; 同时, 地震资料噪声多, 目的层段反射杂乱, 进一步加大断层刻画难度。

针对复杂断裂带信噪比低、断层刻画难等问题, 前人作了诸多研究。噪声压制是地震数据处理重要环节, 传统的高斯滤波、双边滤波等去噪方法属

于各项同性滤波, 在压制噪声的同时也模糊了断层、裂缝及不整合等重要地质信息, 破坏了地质体在地震剖面上边界, 因此, 需要采取非线性的保边滤波技术<sup>[1]</sup>。FEHMERS 等<sup>[2]</sup>将各向异性思想应用到地震数据处理, 通过构造导向滤波对地震数据进行处理, 提高资料信噪比并有效保护断层边界; 陈凤等<sup>[3]</sup>介绍了如何通过数字图像处理技术, 比如各向异性扩散滤波技术来提高地震数据的信噪比; BADDARI 等<sup>[4]</sup>将基于图像的处理技术应用于地震数据滤波, 资料品质得到明显提升; 孙夕平等<sup>[5]</sup>详细讨论了各项异性扩散滤波参数选择, 提出具有旋转不变特性的改进方法, 将相干增强滤波引入数据处理, 优化断层刻画; 张尔华等<sup>[6]</sup>将非线性各向异性扩散滤波方法拓展到三维地震数据预处理中, 提出了新的构造滤波方法; 赵明章等<sup>[7]</sup>利用构造导向滤波技术提高地震资料信噪比, 落实复杂断块圈闭刻画; LAVIALLE 等<sup>[8]</sup>对一致性增强滤波进行了改进, 更好地兼顾去噪与断层边界保护; 杨培杰等<sup>[9]</sup>提出一种方向性边界保护滤波方法, 提高地震信噪比的同时有效保持了断层信息; 李军等<sup>[10]</sup>提出了基于图像熵的各向异性扩散保边去噪方法, 可有效保护断层等小尺度边缘信息。

断层识别上, 常用技术包括方差体、相干体、

收稿日期: 2023-05-16

资助项目: 中海油“十四五”科技重大专项课题“高精度地震勘探技术”(KJGG2022-0304)

第一作者: 秦德文(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地球物理方法方面的工作。E-mail: qindw@cnooc.com.cn

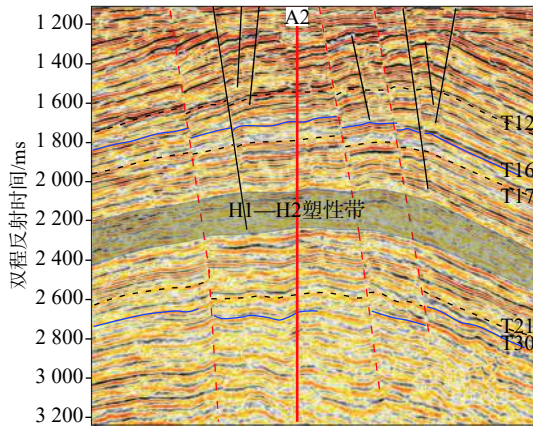


图1 过A2井地震剖面断层分析

Fig.1 Fault analysis on seismic profile across Well A2

曲率及蚂蚁追踪<sup>[11-12]</sup>等。1995年,BAHORICH和FARMER<sup>[13]</sup>基于归一化互相关提出第1代相干体算法,随后,MARFURT等<sup>[14]</sup>利用协方差矩阵求取特征值方法刻画断层,提出了第2代相干体算法;2006年,AL-DOSSAYH和MARFURT<sup>[15]</sup>提出三维空间体曲率,赋予了曲率实际地质意义;JI和HARALICK<sup>[16]</sup>提出了边缘检测算法,在断层边缘检测领域取得了较好应用。上述技术在断层识别刻画中应用广泛且效果良好,但这些属性均为断层结构线性特征,无法进一步获取断层面状结构。对此,HALE<sup>[17]</sup>提出一种新的断层敏感属性,即断层似然属性,可计算出断层发育的可能性大小;甄宗玉等<sup>[18]</sup>提出了基于特定反射系数压制与断层似然属性组合进行断层识别,在河流相储层干扰下仍有较好的应用效果。

本文在前人研究基础上,针对N构造区资料信噪比低、断裂期次复杂等问题,应用非线性各向异性保边滤波方法提高地震资料信噪比、保护断层边界信息;在此基础上,通过断层倾向和倾角扫描方法计算断层似然属性精细表征断层,解决传统方法断层刻画精度较低等问题,落实N构造区断层期次发育特征及复杂断裂幕次。

## 1 方法原理

### 1.1 非线性各向异性保边滤波

传统高斯滤波器是线性滤波,能够较好地进行去噪,但无法保护断层等地质体边缘信息,基于此,PERONA-MALIK<sup>[19]</sup>提出非线性滤波模型(PM模型),根据方向导数差异决定扩散程度。非线性滤波公式如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x,y,t)}{\partial t} = \text{div}[c(|\nabla u|)\nabla u] \\ u(x,y,0) = u_0(x,y) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_0$  为原始数据;

$|\nabla u|$  为梯度模;

$c(|\nabla u|)$  为扩散系数  $c(s)$  关于  $|\nabla u|$  的函数,主要控制扩散方向和扩散量。

对于扩散系数  $c(s)$ , 是单调减函数,并满足以下条件:

$$\begin{cases} c(0) = 1, \lim_{s \rightarrow +\infty} c(s) = 0 \\ b(s) > 0 \\ \lim_{s \rightarrow +\infty} \frac{sc'(s)}{c(s)} = -\frac{1}{2} \text{ 或 } \lim_{s \rightarrow +\infty} c(s) \approx \frac{1}{\sqrt{s}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $b(s) = c(s) + 2sc'(s)$ 。

对此,PERONA与MALIK<sup>[19]</sup>提出了2个扩散系数:

$$c(s) = \frac{1}{1 + (s/k)^2} \quad (3)$$

$$c(s) = e^{-(s/k)^2} \quad (4)$$

式中:  $k$  为梯度阈值。

PM模型中扩散系数仅考虑了梯度模的大小,用  $|\nabla u|^2$  刻画边缘,没有考虑到梯度方向信息。对此,WEICKERT<sup>[20]</sup>基于梯度方向信息提出了新的滤波模型,首先定义结构张量:

$$J_\rho(\nabla u_\sigma) = K_\rho * (\nabla u_\sigma \nabla u_\sigma^T) \triangleq \begin{pmatrix} j_{11} & j_{12} \\ j_{12} & j_{22} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中:  $u_\sigma(\chi) = (K_\rho * u)(\chi)$ ;

$K_\rho$  为方差  $\rho$  的高斯滤波器;

$u_\sigma$  为地震数据与方差  $\sigma$  的高斯窗做卷积;

$*$  代表  $K_\rho$  与  $\nabla u_\sigma \nabla u_\sigma^T$  的元素逐个做卷积。

$J_\rho$  的特征值和特征向量分别为:

$$\begin{cases} \mu_1 = \frac{1}{2} \left[ j_{11} + j_{22} + \sqrt{(j_{11} - j_{22})^2 + 4j_{12}^2} \right] \\ \mu_2 = \frac{1}{2} \left[ j_{11} + j_{22} - \sqrt{(j_{11} - j_{22})^2 + 4j_{12}^2} \right] \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} v_1 = \begin{pmatrix} 2j_{12} \\ j_{22} - j_{11} + \sqrt{(j_{11} - j_{22})^2 + 4j_{12}^2} \end{pmatrix} \\ v_2 = v_1^\perp \end{cases} \quad (7)$$

结构张量特征值  $\mu_1$  和  $\mu_2$  描述了图像在大小为  $O(\rho)$  邻域内沿着特征方向的平均对比度变化,包含数据结构信息,同时,  $\mu_1$  和  $\mu_2$  大小相对关系也决定了图像特征:①  $\mu_1 \approx \mu_2$ , 对应图像的均匀区域;②  $\mu_1 \gg$

$\mu_2 \approx 0$ , 对应图像的线性结构; ③  $\mu_1 \gg \mu_2 \gg 0$ , 对应图像的角点。

特征向量  $v_1 // \nabla u$ , 所以  $v_1$  对应着梯度变化最大方向;  $v_2 \perp v_1$ , 对应着梯度变化最小方向。利用上述结构张量, WEICKERT<sup>[20]</sup> 定义了新的非线性各向异性扩散方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(D(J_\rho(\nabla u))\nabla u) \\ u(x, 0) = u_0(x) \\ (D(J_\rho(\nabla u)), n) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $D$  为依赖结构张量  $J_\rho(\nabla u)$  的矩阵, 称为扩散张量,  $D$  的特征向量与结构张量的特征向量一致, 根据需要可以选择不同特征值。

WEICKERT<sup>[20]</sup> 根据不同滤波目的, 提出了 2 种滤波方案。

$$s_1 = \begin{cases} 1, \mu_1 = 0 \\ 1 - e^{\left(\frac{-3.315}{\mu_1^4}\right)}, \mu_1 \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$s_2 = \begin{cases} \sigma, \mu_1 = \mu_2 \\ \sigma - (1 - \sigma)e^{-\left(\frac{-1}{(\mu_1 - \mu_2)^2}\right)}, \mu_1 \neq \mu_2 \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{Semblance}(t, \theta_x, \theta_y) = \frac{\left[ \sum_{j=1}^J u(t - \theta_x x_j - \theta_y y_j, x_j, y_j) \right]^2 + \left[ \sum_{j=1}^J u^H(t - \theta_x x_j - \theta_y y_j, x_j, y_j) \right]^2}{J \sum_{j=1}^J \left\{ \left[ u(t - \theta_x x_j - \theta_y y_j, x_j, y_j) \right]^2 + \left[ u^H(t - \theta_x x_j - \theta_y y_j, x_j, y_j) \right]^2 \right\}} \quad (11)$$

式中:  $j$  为时窗内第  $j$  道地震数据;

$\theta_x$ 、 $\theta_y$  分别为该道数据在  $x$ 、 $y$  方向上的视倾角;

$x_j$ 、 $y_j$  分别为在  $x$ 、 $y$  方向上距离;

$\theta_x x_j + \theta_y y_j$  为第  $j$  道地震数据与中心点的时移量;

$u^H$  为原始地震道  $u$  的希尔伯特变换结果。

$$\text{Semblance}(t, \theta_x, \theta_y) = \frac{\sum_{k=-K}^K \left\{ \left[ \sum_{j=1}^J u(t - \theta_x x_j - \theta_y y_j, x_j, y_j) \right]^2 + \left[ \sum_{j=1}^J u^H(t - \theta_x x_j - \theta_y y_j, x_j, y_j) \right]^2 \right\}}{J \sum_{k=-K}^K \sum_{j=1}^J \left\{ \left[ u(t - \theta_x x_j - \theta_y y_j, x_j, y_j) \right]^2 + \left[ u^H(t - \theta_x x_j - \theta_y y_j, x_j, y_j) \right]^2 \right\}} \quad (12)$$

相似系数范围为 0~1, 为了放大相邻地震道之间差异性, HALE<sup>[17]</sup> 提出基于相似系数的断层似然属性, 计算方式如下:

$$\text{Likelihood} = 1 - \text{Semblance}^n \quad (13)$$

式(9)为边缘增强各向异性扩散张量, 沿着  $v_2$  (切向方向, 代表梯度值比较小的方向), 扩散系数  $s_2$  为 1, 去掉光滑区域以及边缘上噪声; 沿着  $v_1$  (法向方向, 代表梯度值比较大的方向), 当  $\mu_1$  比较小为光滑区域, 设置值为 1, 当  $\mu_1$  比较大的时候, 代表边缘区域, 应该取比较小的值, 取  $s_1 = 1 - e^{\left(\frac{-3.315}{\mu_1^4}\right)}$ 。

式(10)为相干增强各向异性扩散张量, 沿着  $v_1$  (法向方向), 扩散系数  $s_1$  为  $\sigma$ , 去掉光滑区域以及边缘上噪声; 沿着  $v_2$  (切向方向, 代表梯度值比较大的方向), 当  $\mu_2$  比较小, 为光滑区域, 设置值为  $\sigma$ , 当  $\mu_1$  与  $\mu_2$  不相等时, 代表区域内为不均匀结构, 应该光滑化, 取  $s_2 = \sigma - (1 - \sigma)e^{-\left(\frac{-1}{(\mu_1 - \mu_2)^2}\right)}$ 。

## 1.2 断层似然属性

断层似然属性原理是基于地震数据的相似性分析, 通过对地震数据进行倾向和倾角扫描, 计算对应似然属性, 当倾向和倾角与断层吻合时, 似然属性值最大, 以此实现断层识别。MARFURT 等<sup>[21]</sup> 于 1998 年提出了相似系数的计算方式, 假设时窗内有  $J$  道地震数据, 则相似系数为:

实际地震数据往往存在异常值, 当分母非常小时, 相似系数计算结果会出现异常大值。为了提高计算结果的稳定性, 需要选取计算时窗, 并求取平均值作为最终相似系数。假设对分析点向上、向下分别取  $K$  个采样点, 地震采样间隔为  $\Delta t$ , 则相似系数为<sup>[21]</sup>:

式中: 指数  $n$  用于放大相似系数之间差异性。当相邻地震道差异越大, 相似系数值则越小, 通过  $n$  次方计算后再计算其与 1 的差值, 最终断层似然属性值则会更大, 那么可以认为该样点断裂发育可能性也

较大,从而凸显出断层特征。断层似然属性计算流程如图2所示,将保边滤波预处理后的地震数据作为输入,进行断层倾向和倾角扫描,对每个样点不

同倾向和倾角确定各自的倾斜中心时窗,然后计算其相似系数并得到似然属性,最后选取最大的似然属性值作为输出。

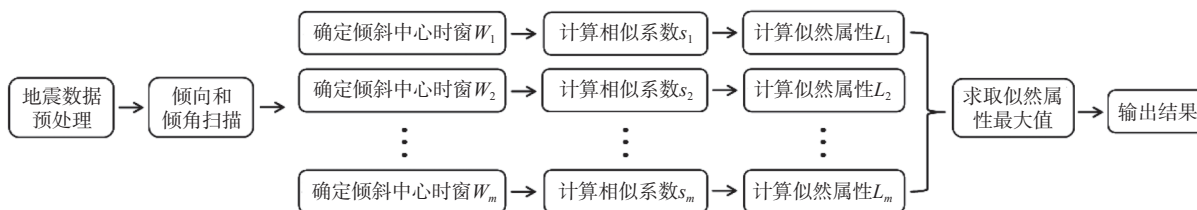


图2 断层似然属性计算流程

Fig.2 Flowchart of fault likelihood attribute calculation

## 2 模型试算

为了验证非线性各向异性滤波去噪与断层似然属性方法效果,选取N构造区某骨干剖面(图3),分别采用线性高斯滤波与非线性各向异性滤波处理。分析可知:原始地震数据(图3a)断面不清且噪声较多,不利于层位、断层解释;图3b为高斯滤波处理,整个剖面成层性更加连续,噪声被有效压制,

但对断层附近边缘的保护效果不好;图3c为非线性各向异性滤波,对比线性高斯方法,噪声得到明显压制,同相轴更连续,而且在局部断层边缘保护上效果更佳(图中蓝色箭头)。

进一步分析断层似然属性断层识别效果,图4a为骨干原始地震剖面,图4b为传统相干方法断层识别,图4c为断层似然属性结果,分析可知:相干属性对于断裂位置刻画较清晰,但缺乏纵向连续性;而断层似然属性不仅能较好表征断裂位置且纵向

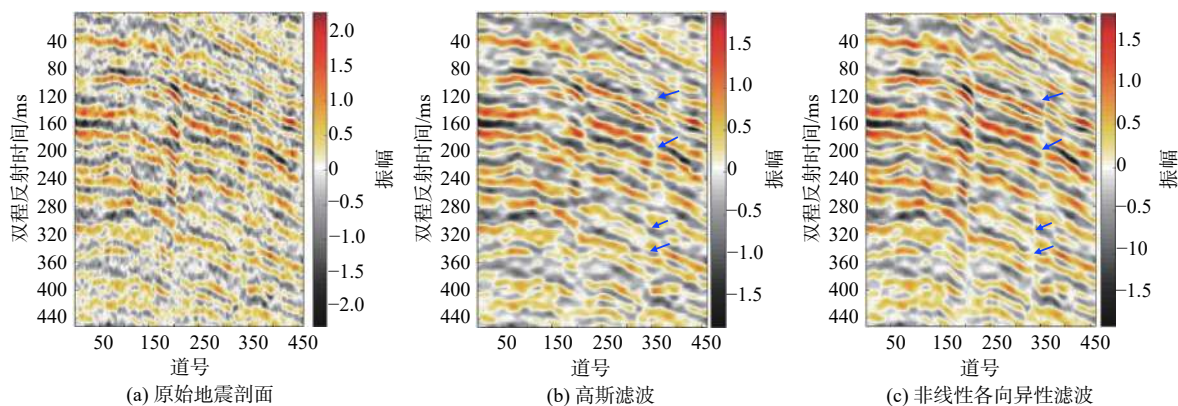


图3 不同滤波去噪方法对比

Fig.3 Comparison of different filtering denoising methods

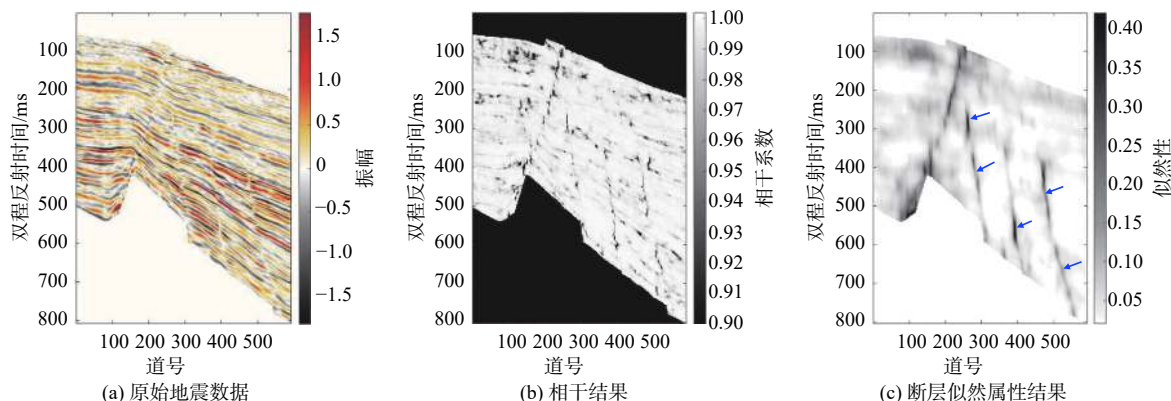


图4 不同断层识别效果对比

Fig.4 Comparison of faults identification outcome using different methods

相对连续合理,适用于后期断层精细解释(图 4c 蓝色箭头)。

数据测试表明,基于非线性各向异性滤波有效地压制了地震随机噪声且断层边界保护良好;在此基础上,利用断层似然属性能更精细地进行断面追踪,验证了该方法组合的有效性。

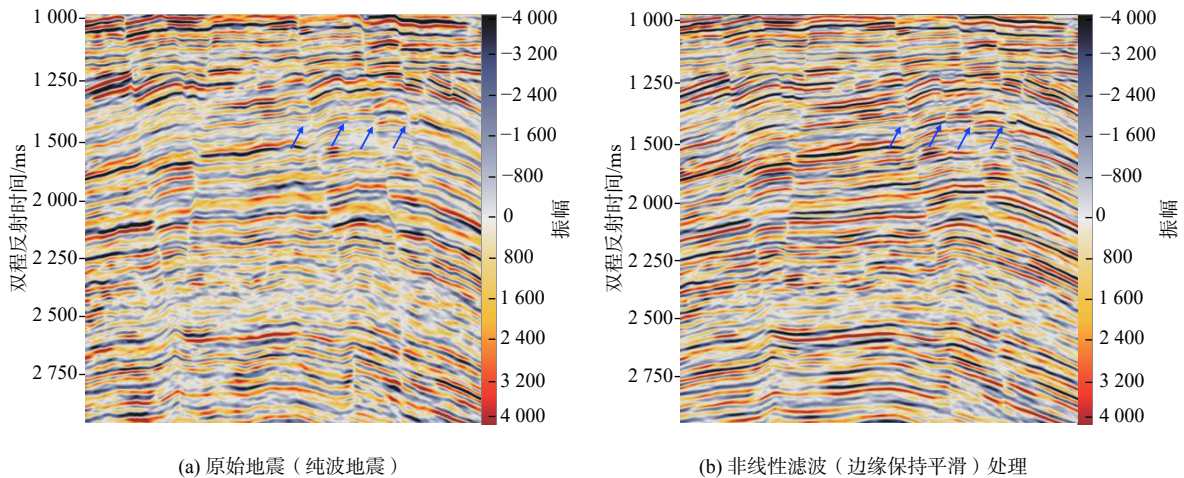
### 3 应用实例

为了进一步验证方法可靠性,将其应用到 N 构造区。图 5 所示为近 EW 向骨干剖面滤波前后对比,图 5a 为原始地震,图 5b 为滤波后地震。通过非线性各向异性滤波处理,资料噪声得到显著压制,信噪比提升,同相轴连续性更好;同时保留了断层边界信息,断面清晰且交切关系更明显,对无法识别和确定的小断层及断裂,其更加清晰且易识别(图 5 蓝色箭头)。

对原始地震做完非线性滤波后,进一步开展相干和断层似然属性计算,图 6a 所示为原始骨干剖

面, H1—H2 段为塑性带(图中红色箭头),地震反射杂乱,能量相对较弱,断层特征不明显,难以分析断层的走向和倾向,进一步增大断层刻画难度。图 6b 为传统相干属性,可以看到背景噪声干扰明显,该方法抗噪性不强,对大断层刻画较好,而小断层及断裂刻画效果不足,尤其在塑性带内的断层刻画效果较差(图中红色箭头)。

图 6c 为基于非线性滤波的断层似然属性,对比可知,该方法背景噪声干扰较小,断层刻画效果有明显提升,塑性带内的断层也更清晰,可指示断层发育可能性的大小。对比传统相干方法,该方法的抗噪性和断层刻画效果更佳,图 6c 可以看到原本 3 条“上正下逆”的 EW 向断层在塑性带内断开,证实上下断裂为不同期次,结合研究区地质背景,认为该现象是由早幕、晚幕断层耦合引起。图 7 为 A5 井的小尺度断裂识别效果,从过 A5 井断层似然属性剖面可知,实钻井深度 3 260 和 3 512 m 附近发育小尺度断裂带。同时,图 7b、c 的 A5 井成像测井显示这 2 处深度段发育多条断裂,证实了本

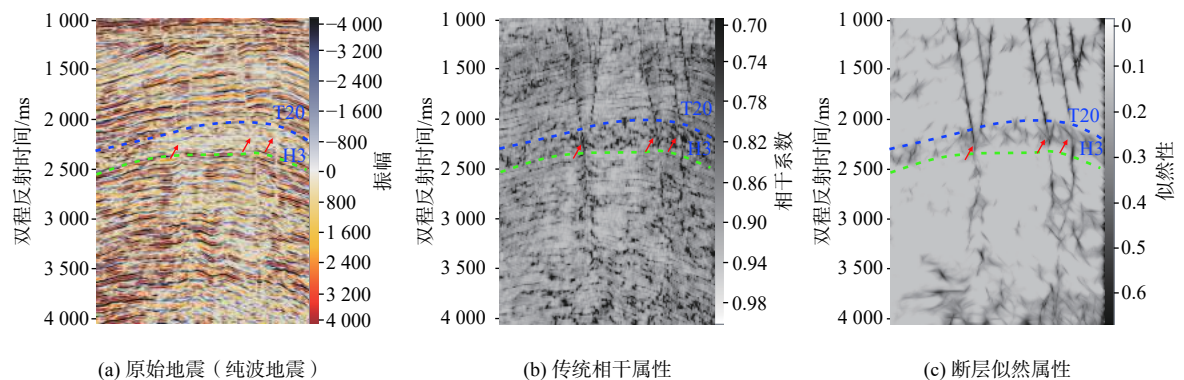


(a) 原始地震 (纯波地震)

(b) 非线性滤波 (边缘保持平滑) 处理

图 5 非线性各向异性滤波结果

Fig.5 Results of nonlinear anisotropic filtering



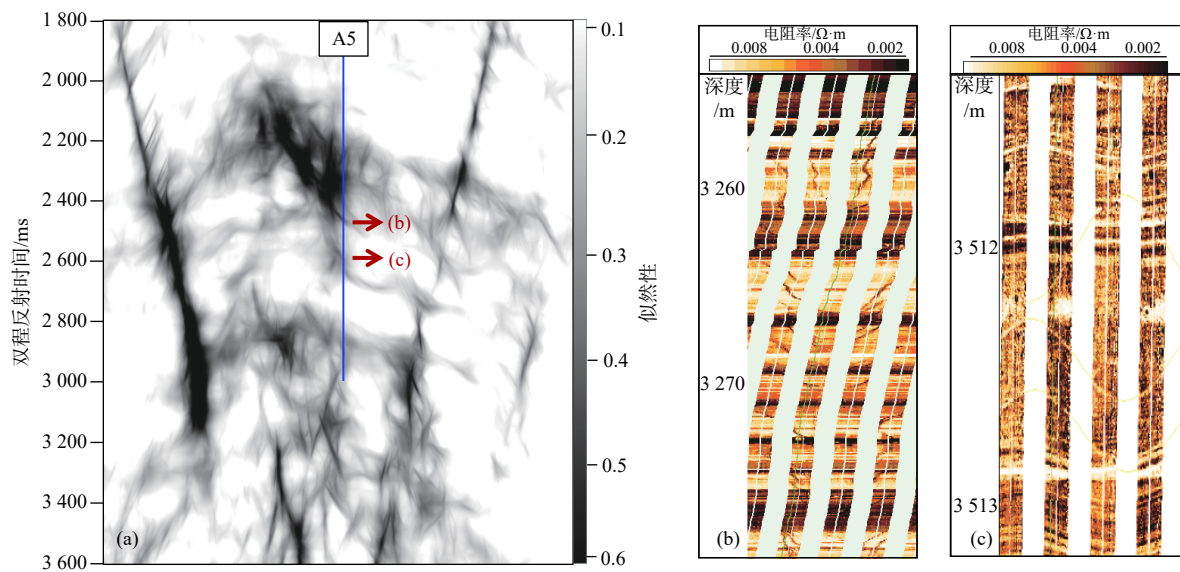
(a) 原始地震 (纯波地震)

(b) 传统相干属性

(c) 断层似然属性

图 6 不同方法断层刻画效果对比

Fig.6 Comparison of the effect of different methods for fault characterization



(a) 过 A5 井断层似然属性剖面; (b) A5 井成像测井(深度 3 260 m); (c) A5 井成像测井(深度 3 512 m)

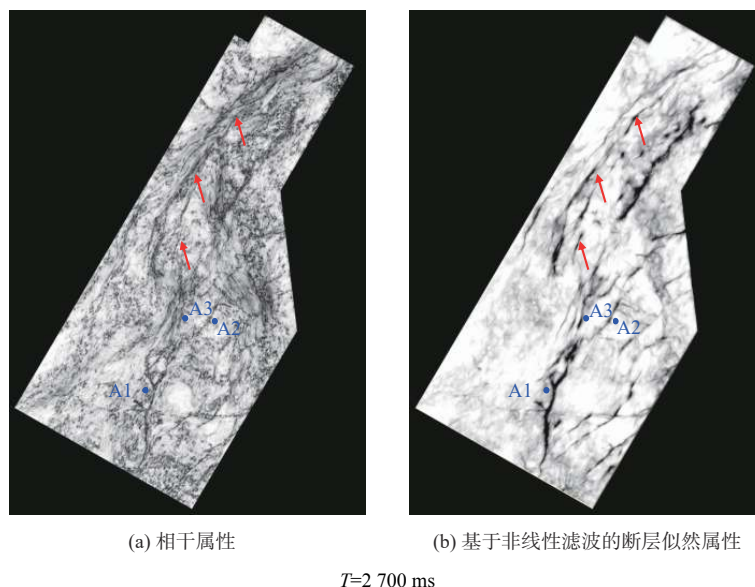
图 7 A5 井小尺度断裂识别效果

Fig.7 Identification effect of small-scale faults in Well A5

文方法能在一定程度上刻画小尺度断裂。

进一步对靶区 3D 数据体分别计算相干属性和基于非线性滤波的断层似然属性, 分析断层展布及交切关系。图 8 为靶区  $T=2\ 700\text{ ms}$  切片效果,

图 8a 为相干属性, 图 8b 为断层似然属性, 对比可知, 前者中仍存在较多背景噪声干扰, 而通过本文方法处理, 噪声干扰得到明显压制, 构造大断裂展布和走向更清晰。



(a) 相干属性

(b) 基于非线性滤波的断层似然属性

$T=2\ 700\text{ ms}$

图 8 断层刻画效果切片对比

Fig.8 Slice comparison in the effect of tomography

基于非线性滤波的断层似然属性对靶区断层重新解释并分析断层幕次关系(图 9), 以 H1—H2 塑性带为界, 发育早、晚幕断层, 早幕断层以屋脊状断层为主, 倾角较陡, 断面近直立, 上段消亡在 H1—H2 塑性带, 下断至花港组底部(蓝色线段);

晚幕断层为正断层, 断距明显且倾角较缓, 上断至 T12—T10, 下段则多消亡于 H1—H2 塑性带(黑色线段)。通过本文方法组合较好地明确早晚幕耦合情况及断层幕次, 有利于后期圈闭有效性分析。

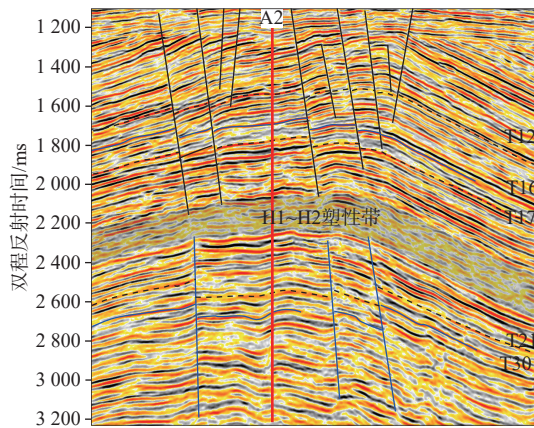


图 9 研究区断层幕次分析

Fig.9 Fault stage analysis in the study area

## 4 结论

针对西湖凹陷中央背斜带 N 构造区地震资料噪声多、断裂复杂等问题,本文开展了基于非线性各向异性保边滤波的断层似然属性研究,得到以下几点认识:

(1)地震资料噪声影响断层刻画精度,对于噪声较多的资料需要传统线性滤波去噪,在压制噪声过程中破坏了断层边界信息,而非线性各向异性保边滤波能够较好地压制噪声且有效保护断层边缘信息,有助于后续开展断层研究。

(2)在断层刻画中,传统相干对大断裂刻画较好,而小断层刻画精度不够,且抗噪性较差;本文的断层似然属性对断层的刻画效果更好,无论是剖面还是切片对比,断层走向和交切关系均更清晰,小断裂展布也更明显,靶区 H1—H2 塑性带断层形态更清晰,抗噪性更强。

(3)基于非线性各向异性保边滤波的断层似然属性有效完成了研究区晚期断层幕次分析,分析认为 A2 井区附近 3 条断层的“上正下逆”现象实为早、晚幕断层耦合引起。

(4)本文方法在倾向和倾角扫描效率较低,计算量较大,算法还需要进一步优化;同时,方法对地震资料品质有一定要求,断层识别对于信噪比较低的资料的抗噪性较差,后续需进行深入研究。

### 参考文献:

[1] 张淑桐.地震资料保边滤波方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2017.  
[2] FEHMERS G C, HOCKER C F W. Fast structural interpretation with structure-oriented filtering[J]. *Geophysics*, 2003,

68(4): 1286-1293.  
[3] 陈凤,李金宗,黄建明,等.利用数字图像处理技术提高地震剖面图像信噪比[J].*地球物理学进展*,2003,18(4): 758-764.  
[4] BADDARI K, FERAHTIA J, AIFA T, et al. Seismic noise attenuation by means of an anisotropic non-linear diffusion filter[J]. *Computers and Geosciences*, 2011, 37(4): 456-463.  
[5] 孙夕平,杜世通,汤磊.相干增强各向异性扩散滤波技术[J].*石油地球物理勘探*,2004,39(6): 651-655.  
[6] 张尔华,王伟,高静怀,等.非线性各向异性扩散滤波器用于三维地震资料噪声衰减与结构特征增强[J].*地球物理学进展*,2010,25(3): 866-870.  
[7] 赵明章,范雪辉,刘春芳,等.利用构造导向滤波技术识别复杂断块圈闭[J].*石油地球物理勘探*,2011,46(1): 128-133.  
[8] LAVIALLE O, POP S, GERMAIN C, et al. Seismic fault preserving diffusion[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2007, 61(2): 132-141.  
[9] 杨培杰,穆星,张景涛.方向性边界保持断层增强技术[J].*地球物理学报*,2010,53(12): 2992-2997.  
[10] 李军,张军华,刘杨,等.图像熵各向异性扩散保边滤波方法及在断层识别中的应用[J].*石油地球物理勘探*,2019,54(2): 365-370.  
[11] 李婷婷,侯思宇,马世忠,等.断层识别方法综述及研究进展[J].*地球物理学进展*,2018,33(4): 1507-1514.  
[12] 刘松鸣,武刚,文晓涛,等.曲率方位加强技术在识别低序级断层中的应用[J].*断块油气田*,2019,26(1): 37-41.  
[13] BAHORICH M S, FARMER S L. 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features[J]. *The Leading Edge*, 1995, 14(10): 1053-1058.  
[14] GERSZTENKORN A, MARFURT K. Eigenstructure based coherence computations as an aid to 3D structural and stratigraphic mapping[J]. *Geophysics*, 1999, 64(5): 1468-1479.  
[15] AL-DOSSARY S, MARFURT K J. 3D volumetric multispectral estimates of reflector curvature and rotation[J]. *Geophysics*, 2006, 71(5): 41-51.  
[16] JI Q, HARALICK R M. Efficient facet edge detection and quantitative performance evaluation [J]. *Pattern Recognition*. 2002, 35(3): 689-700.  
[17] HALE D. Methods to compute fault images, extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3D seismic images[J]. *Geophysics*, 2013, b, 78(2): 033-043.  
[18] 甄宗玉,陈华靖,张鹏志,等.基于特定反射系数压制与最大似然属性的断层识别方法[J].*断块油气田*,2021,28(3): 335-339.  
[19] PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(7): 629-639.  
[20] WEICKERT J. A review of nonlinear diffusion filtering[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 1997, 1252: 3-28.  
[21] MARFURT K, KIRLIN R, FARMER S, et al. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm[J]. *Geophysics*, 1998, 63(4): 1150-1165.

## Application of fault likelihood attribute based on edge-preserved filter in complex fault identification of Xihu Sag

QIN Dewen, LIU Qingwen, LI Qin

(Shanghai Branch of CNOOC (China) Ltd., Shanghai 200335, China)

**Abstract:** The N structure of the central anticlinal belt of Xihu Sag is rich in oil and gas resources, but it has undergone frequent geological activities with complex fault stages and cross-cutting relationship. In addition, the signal to noise ratio of seismic data in the target area is low, and the reflection of the target interval is chaotic, which further affects the fine description of faults. In this paper, nonlinear anisotropic edge-preserved filter technology was used to denoise and overcome the problem of traditional linear filter to fault edge, and considered the noise suppression and boundary information protection. The fault tendency and dip angle were scanned at each sample point, the similarity coefficient and likelihood attribute were calculated successively, and the maximum likelihood attribute value was selected as the final result. This method could characterize faults more accurately than the traditional coherence algorithm. The application of actual data shows that the combination of nonlinear anisotropic edge-preserved filter and fault likelihood attribute could better suppress random noise and protect fault boundary information, the fault characterization precision was greater, and could better characterize the complex fault stages in the N structure in more detail.

**Key words:** fault identification; nonlinear anisotropic filtering; boundary protection; noise suppression; fault likelihood attribute