

基于 likelihood 地震属性的致密气藏断裂预测

——以四川盆地川西坳陷新场地区须二段为例

李蒙,商晓飞,赵华伟,吴双,段太忠

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:传统地震断裂预测属性难以满足致密砂岩气藏勘探开发中对不同尺度断裂精细刻画的需求。将 likelihood 属性引入四川盆地须家河组致密砂岩气藏断裂识别,建立了基于 likelihood 属性及其衍生属性的地震断裂预测方法体系,提出基于 Otsu 阈值分割方法和成像测井约束下的断层发育区、裂缝带发育区和断裂欠发育区的空间分类,实现了对新场地区须家河组二段断裂精细预测。研究表明:经细化处理的 likelihood 属性可以体现最可能发育断裂的位置及其概率,断裂密度属性则有效反映了断裂发育强度特征,该属性对产量具有一定预测性。基于 likelihood 地震属性的断裂预测方法有效提升了新场地区须二段致密气藏断裂地震预测效果,对于其他裂缝型储层断裂预测具有一定借鉴意义。

关键词:likelihood 属性;阈值分割;高产气层;断裂预测;致密气藏;须家河组;新场地区;川西坳陷

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Prediction of fractures in tight gas reservoirs based on likelihood attribute —A case study of the 2nd member of Xujiahe Formation in Xinchang area, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

Li Meng, Shang Xiaofei, Zhao Huawei, Wu Shuang, Duan Taizhong

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Traditional fracture prediction methods based on seismic attributes fail to meet the demand for high-precision prediction of fractures of different scales in the exploration and development of tight sandstone gas reservoirs. By introducing the likelihood attribute into the identification of fractures in tight sandstone gas reservoirs in the Xujiahe Formation, Sichuan Basin, a seismic prediction method for fractures based on likelihood and derived attributes is established. The Otsu threshold segmentation method and constraints from image log interpretation are also employed to classify the reservoir space into fault zones, fracture zones and underdeveloped fracture zones and to perform a fine prediction of fractures in the second member of Xujiahe Formation (Xu 2 member) in Xinchang area. Results show that the thinned likelihood attribute can reveal the most possible fracturing locations and probabilities. The fracture density reveals the fracturing intensity, which can be used to predict oil/gas production of a certain location. The fracture prediction based on likelihood attribute has effectively improved the seismic prediction accuracy of tight gas reservoirs in the Xu 2 member in the Xinchang area, and is of referential value to the prediction of other fractured reservoirs.

Key words: likelihood attribute, threshold segmentation, high gas production zone, fracture prediction, tight gas reservoir, Xujiahe Formation, Xinchang area, West Sichuan Depression

致密气一般是指低渗透-特低渗透砂岩或碳酸盐岩储集层中,无自然产能,需通过大规模压裂或特殊采气工艺才能产出具有工业经济价值的天然气。中国致密砂岩气资源的技术可采量为 $(12 \sim 15) \times 10^{12} \text{ m}^3$,是

中国天然气的重要来源^[1]。川西坳陷须家河组二段(须二段)气藏地质储量大,但低孔、低渗的物性特点及较强的非均质性导致其储量动用程度低。

致密气藏中的断裂可以明显改善储层渗透性能,

收稿日期:2019-09-10;修订日期:2020-10-26。

第一作者简介:李蒙(1988—),男,博士、工程师,地质与地球物理综合解释。E-mail:limeng_syky@sinopec.com。

基金项目:国家青年科学基金项目(41702359);中国石化科技部项目(P18089-3);中科院先导A项目(VDA14010204)。

也提供了少量有效储集空间,是控制油气富集规律和产能的重要参数,因此断裂预测是致密气藏评价重要工作内容之一。岩心观察与测井数据断裂解释是裂缝预测的常用方法,具有较高的解释精度^[2-4],但由于断裂的强非均质性和强各向异性,井间断裂难以通过测井资料推测。地震响应中包含断裂反射信息,为断裂在储层空间中的解释提供了可能。目前主流的地震断裂预测方法采用叠后地震属性,包括曲率、方差和相似性^[5]等属性,基于方差的蚂蚁追踪处理方法^[6]可以强化断裂显示,常规叠后断裂属性对主干大尺度断裂刻画效果较好,但对小尺度断裂的刻画精细程度不足。在致密气藏的勘探开发过程中,无论甜点预测还是地质建模都需要地震解释提供可靠的小尺度断裂信息。

Likelihood 属性(以下简称 L 属性)是 Hale 在 2012 年提出的一种基于样点处理的断裂成像算法^[7],较基于波形相似性计算的传统地震裂缝预测属性精度明显提升,不易漏失小尺度断裂。该方法在国内少数油田或煤田得到了初步应用^[8-10],断裂预测效果良好。致密气藏勘探开发要求对不同尺度断裂有效预测,预测结果对高产井部署有较好的指导意义。针对致密气藏断裂预测特点与需求,本文建立了一套基于 L 属性提取、属性阈值自动优选、断裂片提取、断裂密度计算及生产动态匹配分析的断裂综合预测方法体系,强调断裂解释成果的多样性和多用性。解释成果包括断裂发育概率体、断裂密度与断裂片等多种类型数据,预测成果直接用于预测断裂空间分布、约束裂缝建模与高产气层的初步预测。

1 L 属性算法基本原理

L 属性表达了断裂存在的可能性,计算原理基于相似性属性。首先计算以突出断裂识别为导向的相似性属性 semblance(以下简称 S 属性)(数值范围 0 ~ 1),具体原理如下:

$$S = \frac{[(g)_s]^2_f}{[(g^2)_s]_f} \quad (1)$$

式中: g 为三维地震数据体; $(\cdot)_s$ 代表对括号内地震数据体进行构造导向平滑; $[\cdot]_f$ 代表沿断裂走向、倾向方向进行滤波,用于增强 S 属性值计算的稳定性。地层横向上的高连续性导致 S 属性值在大多数空间位置处接近于 1,难以区分不同尺度断裂存在的可能性。为提高不同样点间的对比度, L 属性值被定义为:

$$L = 1 - S^8 \quad (2)$$

由公式(2)可知 L 属性表达断层发育可能性的基

本原理:当断裂较为发育时,地震反射连续性与相似性降低, L 属性增强;反之, L 属性减弱; L 属性(表征断裂发育的可能性)值范围在 0 ~ 100%。S 值的幂是经验数值, L 值是相对量,表达了空间某一位置相对其他位置发育断层可能性的大小。

为进一步精细描述裂缝分布位置,通过计算 L 每个采样点不同方位与倾角的 L 属性值,并保留最大 L 属性值及对应的倾角、方位角,可得到 thinned likelihood(以下简称 TL)属性体,帮助刻画最可能发育的断裂的准确位置信息。本文中的 L 属性值和 TL 属性值均通过 OpendTect Pro 软件计算获得。

2 基于 L 属性的裂缝预测与解释流程

针对致密气藏断裂预测需求,为充分发挥 L 属性价值,提取多方面断裂信息,提出如下针对致密砂岩气藏的断裂预测与解释流程(图 1)。计算 L 属性值前需要初步评价噪音对断裂属性提取的影响,噪音严重时会影响断裂解释的准确性,可利用构造导向滤波技术降低噪音干扰,增强断裂显示;细化处理后的 L 属性通过阈值分割判定断裂识别属性下限;基于 L 属性,结合阈值分割结果可进一步计算断裂密度属性,评价空间中断裂发育程度;对 L 属性做细化处理可增强断裂显示,并提取断裂片用于约束裂缝建模;生产动态数据与断裂预测结果间的匹配分析有助于确定高产气层空间分布。

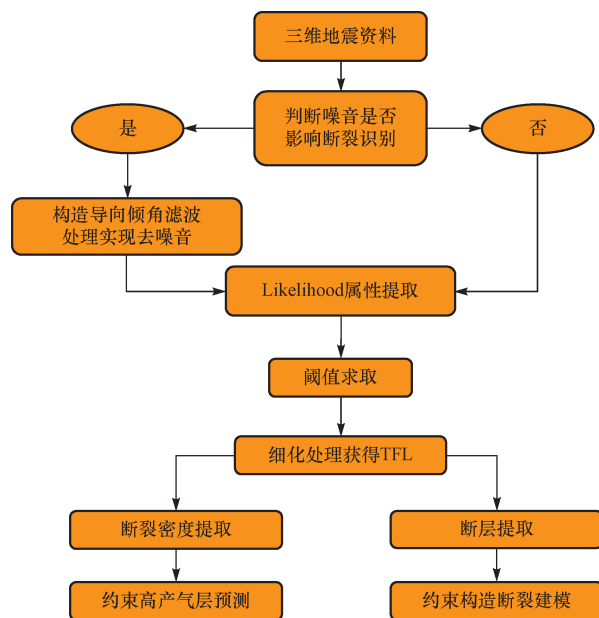


图 1 基于 likelihood 属性的断裂预测与解释流程

Fig. 1 Fracture prediction and interpretation process based on likelihood attribute

2.1 L 与 TL 属性计算参数选择

L 属性关键计算参数包括方位角范围与步长、倾角范围与步长。宽泛的方位角与倾角范围有利于尽可能多的提取地震数据中包含的断裂信息;计算步长越小,精度越高,但断裂的纵向连续性相对变差。提取 TL 属性时的主要参数是空间中水平方向与垂直方向计算步长:小计算步长有利于小尺度断裂识别,大计算步长可以明显改善大尺度断裂的空间连续性。为避免将水道、三角洲等沉积体边缘错误识别为断裂,垂直方向计算步长应至少大于目的层中储层厚度以避免沉积相变对断裂识别的干扰。

2.2 属性阈值优选

利用地震与测井资料识别的断裂通常难以直接标定:①多数井筒接近于直立,平面上呈点状分布的井孔数据难以真实反映高角度断裂发育程度;②地震断裂预测可以反映整个工区的断裂分布趋势,但与井筒测井资料相比,分辨率较低的地震资料难以将低角度断裂从纵向上频繁的地层岩性变化中区分出来;③测井资料可以反映单条裂缝特征(如井壁成像测井),地震只能描述断层或裂缝带,无法刻画单条断裂。从资料采集方式与特点看,井筒资料善于识别低角度、小尺度断裂,叠后地震信息更多反映中、大尺度的高角度断裂。

虽然无法利用测井信息对地震属性进行直接标定,但可以通过分区或分类方式间接实现地震属性对不同尺度断裂的划分。致密砂岩地层在空间上可根据断裂尺度和断裂发育强度大致划分为断层发育区、裂缝带发育区、断裂弱发育区 3 类。L 属性具有精细刻画断裂系统的能力,为上述 3 类区域划分提供了可能,但须确定 L 属性两个合理的阈值。

1) 断层发育区阈值的确定

在断裂敏感地震属性中,大尺度断层发育区与其他区域表现特征明显不同,本文提出基于最大类间方差(Otsu)算法自动获取阈值,实现断层发育区的划分。Otsu 于 1976 年曾提出最大类间方差阈值自动提取算法,可自动计算图像不同类之间的分割阈值,保证类间差别最大^[12]。Otsu 提出最大类间方法阈值分割法时,应用对象是灰度图像,本文将该方法扩展至地震数据阈值求取。假设地震属性依据大小可划分为 M 个级别,属于第 i 级的样点数量为 n_i ,样点总数即为:

$$N = n_1 + n_2 + \cdots + n_L \quad (3)$$

将样点统计数进行归一化,将其转化为一种概率分布,形式如下:

$$p_i = n_i / N \quad (4)$$

式中: $p_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^L p_i = 1$ 。样点即将被二分为 C_0 类和 C_1 类(及背景区域和目标区域),假设阈值是 M 个级别中的第 k 级。 C_0 类包含 1 到 k 级样点, C_1 类包含 $(k+1)$ 到 M 级样点。假设 $P_0(T)$, $P_1(T)$ 分别表示 C_0 类和 C_1 类出现的概率, $u_0(T)$, $u_1(T)$ 分别表示 C_0 类和 C_1 类的平均属性值,则:

$$P_0(T) = \sum_{i=0}^T p_i \quad (5)$$

$$P_1(T) = \sum_{i=0}^T p_i \quad (6)$$

$$u_0(T) = \sum_{i=0}^T \left[i \frac{p_i}{P_0(T)} \right] \quad (7)$$

$$u_1(T) = \sum_{i=T+1}^{M-1} \left[i \frac{p_i}{P_1(T)} \right] \quad (8)$$

地震属性的平均级别可表示为:

$$u = \sum_{i=1}^M i p_i = P_0(T) u_0(T) + P_1(T) u_1(T) \quad (9)$$

类间方差 $\delta_b^2(T)$ 表示为:

$$\delta_b^2(T) = P_0(T) [u_0(T) - u]^2 + P_1(T) [u_1(T) - u]^2 \quad (10)$$

当类间方差达到最大时,此时的第 k 级是最优分割值,即 Otsu 阈值:

$$T^* = \arg \max_{1 \leq T \leq M} \{ \delta_b^2(T) \} \quad (11)$$

在实际地震属性阈值计算时,利用遍历法即可快速找到 Otsu 阈值。实际地震资料证明了该方式分割大尺度断层发育区与其他区域的有效性。

2) 裂缝带发育区与断裂弱发育区之间 L 属性阈值的确定

地震与测井成像尺度不同,难以直接相互标定以建立一种相互转换的模型。但通过成像测井解释获得的裂缝发育密度参数可用于约束 L 属性阈值的选取以合理分割裂缝带发育区与断裂弱发育区。在新场地区须二段,本文尝试利用上述方法确定了裂缝带发育区与断裂弱发育区之间 L 属性阈值。

2.3 断裂密度计算原理

断裂密度是一种对断裂在空间中发育程度的定量描述方式。常见的断裂密度通常可分为线密度、面密度与体密度。相比于 L 属性,TL 属性保留了最大 L 属性值,其所反映的断裂位置收敛,形态更接近于小型裂缝带,因此本文基于 TL 属性求取断裂密度,将其定义为单位面积中断裂通过地震道数量与单位面积内地震

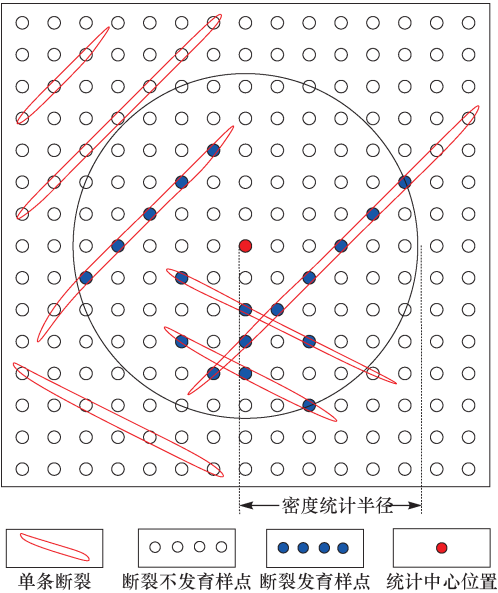


图 2 断裂密度统计方式示意图

Fig. 2 Sketch diagram showing the statistical principle for fracturing density

道总数比值。图 2 中为断裂密度属性求取的简单示意,所示单位面积内包含 97 个地震道,断裂总共经过了 17 个地震道,断裂密度即可计算为 0.175。通过这一方式可获得三维断裂密度数据体,反映空间中每个样点断裂发育的程度。

2.4 裂缝预测与生产动态匹配分析

针对深层致密砂岩气藏高产气藏分布规律,蔡希源曾指出,有效孔隙控制了天然气的分布,裂缝控制了天然气的高产^[11]。达到一定的断裂发育强度是高产气层存在的必要条件。地震断裂密度对生产动态的影响分析可用于进一步评价地震断裂预测效果,并指导高产气层空间分布预测。

3 应用实例

3.1 研究区概况

新场地区位于龙门山前缘的川西坳陷(图 3),经印支、燕山和喜马拉雅等多期构造运动改造,沉积环境完成了由海—海陆过渡—陆相的变迁。该区上三叠统须家河组,自下而上分为须家河组一段(须一段)至须五段。新场地区须二段属三角洲前缘到前三角洲沉积体系,多套进积型三角洲分支河道叠加毯状砂或河口砂坝,是储集性较好的砂体,表明其具备形成大中型气田的良好储层条件^[11]。但须二段气藏兼具超深、超低

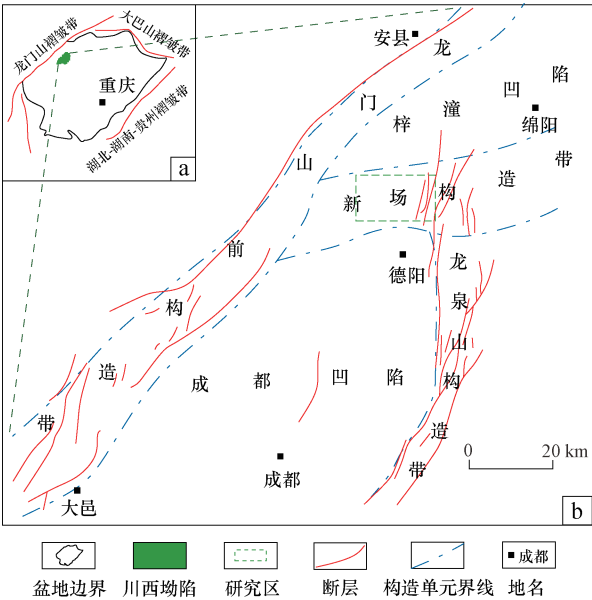


图 3 川西坳陷新场地区地理位置

Fig. 3 Location of the Xinchang area, western Sichuan Depression
a. 川西坳陷在四川盆地中的相对位置;
b. 新场区在川西坳陷中的相对位置

孔渗、超高压、超致密等特征^[13],勘探开发的主要目的是寻找“缝控型甜点”^[12],难度较大。

须二段气藏储层致密,孔隙度介于 2% ~ 4%,基质渗透率为 $(0.04 \sim 0.16) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。天然裂缝的发育可以改善渗流条件,是高产储层预测的关键因素^[15]。井壁成像的裂缝统计分析表明,该区域内的裂缝主要集中在 NWW - SEE 向至 NEE - SWW 向之间、NW - SE 向和 NE - SW 向,主要发育低角度和高角度斜交缝,且砂岩是裂缝的主要载体^[14]。

本文研究基于 2006 年采集的叠后深度偏移资料,面积约 400 km²。须二段目的层峰值频率约 27 Hz(图 4b),地震反射连续性较好,信噪比较高,有利于层位与断裂解释(图 4a)。通过精细井震标定与高精度层位解释,井分层与地震层位格架(图 4a 中 S2—S6 层位)具备了较好的对应关系。该层序地层格架可满足断裂预测与地震属性分析需求。

3.2 基于 Likelihood 属性的断裂预测

地震资料信噪比较高,将叠后三维地震数据体作为输入数据计算得到 L 属性,其数值代表断层存在的可能性。为了合理划分储层为断层发育区、裂缝带发育区与裂缝带弱发育区,应用 Otsu 阈值求取法和成像测井约束法确定了 L 属性分割阈值。通过细化算法处理,进一步将 L 属性转换为在平面与剖面中呈线状分布的 TL 属性,并提取了断裂片和断裂密度属性。

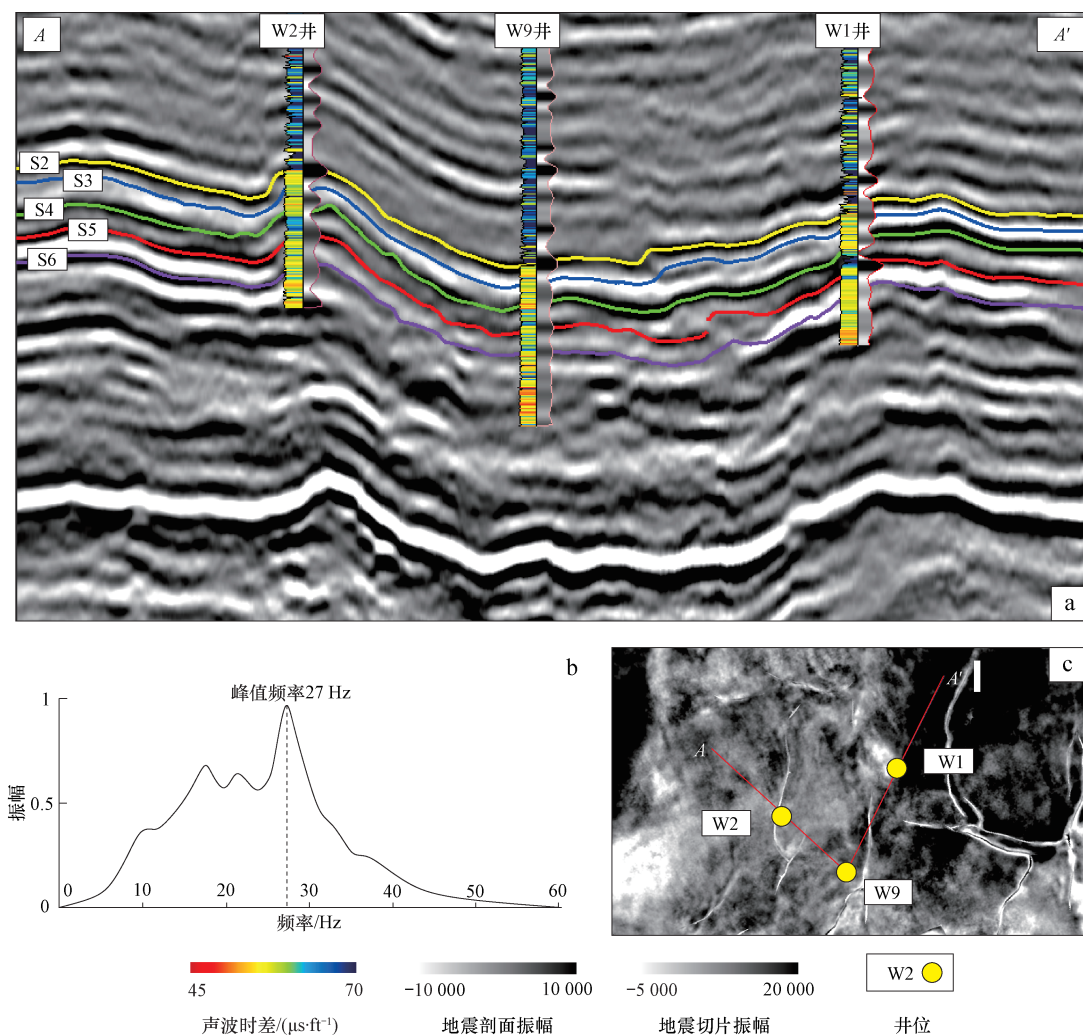


图4 川西坳陷新场地区典型联井地震剖面及目的层振幅谱

Fig. 4 Typical cross-well seismic profiles and amplitude spectrum of the target layer in the Xichuan area, western Sichuan Depression

a. 新场地区典型联井地震剖面; b. 目的层振幅谱; c. 沿 S2 层振幅切片

3.2.1 L 属性提取与对比分析

L 属性计算时关键的参数是计算步长的选择。据测井岩性解释曲线,研究区单砂体厚度不超过 30 m,双程旅行时约超过 15 ms(研究区目的层砂岩平均速度约 4 000 m/s)。为避免将沉积相边缘错误解释为断裂,将计算时间步长设置为 30 ms。

为评价 L 及 TL 属性断裂刻画效果,本文同时提取了曲率、相似性、L 属性及 TL 属性 4 种地震属性。图 5 展示了 4 种断裂预测地震属性联井纵剖面。曲率属性(图 5b)对大型断裂有所响应(例如 W3 井附近大型断裂有明显的异常响应),但对大多数断裂难以准确识别和刻画,并反映出该属性对噪音敏感,不适用于本研究区断裂刻画;相似性属性(图 5c)在地层高程突变位置表现出了强异常(W3 井和 W7 井附近),但断裂异常信号缺乏连续性,难以反映真实的断裂展布;L 属性

(图 5d)反映出了不同倾角断裂发育趋势,在剖面中呈现出不同尺度的断裂异常,尤其可反映断裂发育密集区中断裂发育程度的纵向与横向变化趋势;TL 属性对 L 属性做细化处理的结果,断裂成像的能力明显大大增强,可以精准反映最有可能发育断裂的位置和发育强度。

图 6a, b, c 和 d 分别展示了曲率属性、相似性属性、L 属性和 TL 属性位于 2 砂组顶面的切片。不同属性所反映的主要断裂趋势是一致的,但曲率(图 6b)受噪音影响严重,难以反映主断裂之间的细节;相似性属性(图 6b)对小型断裂或裂缝带刻画能力不足,难以支撑断裂精细描述研究;L 属性(图 6c)在主断裂位置处表现为强异常,井间呈现出强弱不一的较为连续的交错的线状响应,其数值大小反映的是不同尺度断裂发育概率;TL 属性(图 6d)在平面上可以看出大尺度断裂(属性颜色更深)具有一定的方位趋

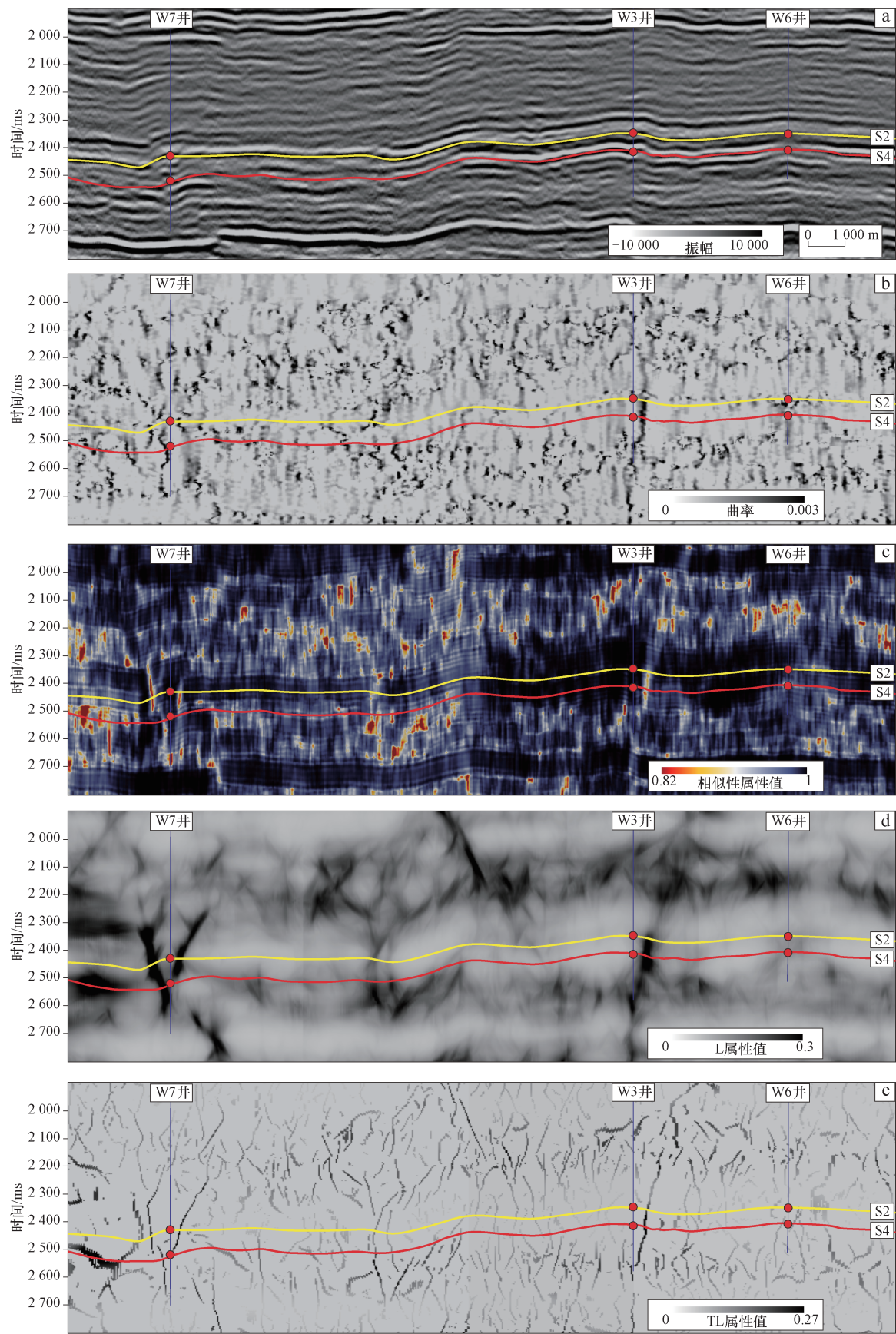


图 5 川西坳陷新场地区不同断裂属性典型联井剖面对比

Fig. 5 Comparative analysis of typical cross-well profiles with different fracture attributes in the Xinchang area, western Sichuan Depression
a. 原始地震剖面; b. 曲率属性剖面; c. 相似性属性剖面; d. L 属性剖面; e. TL 属性剖面

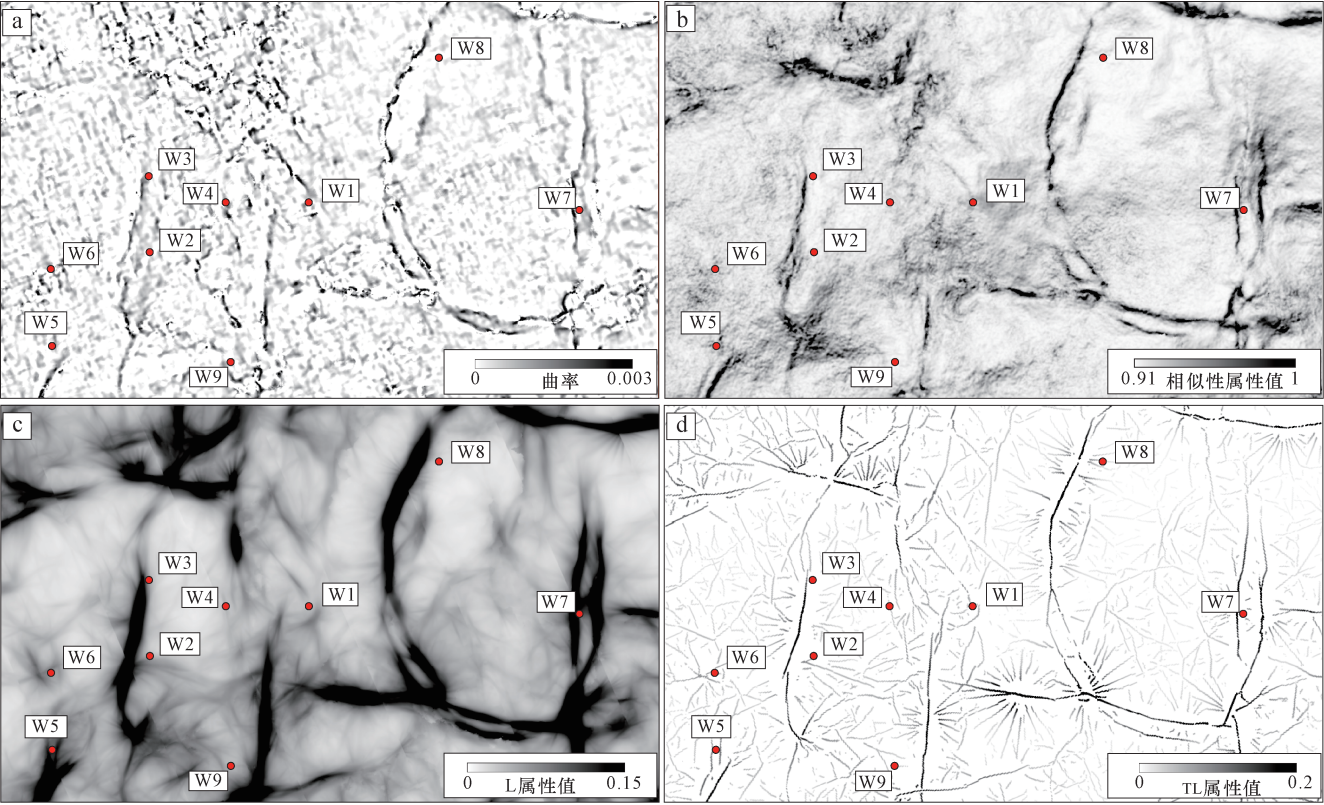


图 6 川西坳陷新场地区须二段 2 砂组顶面不同属性刻画断裂效果对比

Fig.6 Optimization analysis of fracture properties of the top surface of the No. 2 sandbody in the Xu 2 member, Xinchang area, western Sichuan Depression

a. 曲率切片;b. 相似性属性切片;c. L 属性切片;d. TL 属性切片

势,小断裂更多地呈树枝状分布于大断裂附近,符合大断裂受区域地应力控制、小断裂性质受控于所伴生的大断裂的地质认识。L 属性和 TL 属性中包含着丰富的细节信息。综合上述对比研究,相比曲率或相干等传统断裂预测属性,L 属性可以更好反映断裂发育的趋势,TL 属性则大幅度提升了地震识别、刻画小型断裂的能力。

3.2.2 阈值分割参数优选

断裂精细识别与裂缝精细建模要求地震能够刻画不同尺度断裂。须二段致密砂岩地层在空间上可根据断裂尺度和断裂发育强度大致划分为断层发育区、裂缝带发育区、断裂弱发育区 3 类。L 属性对断裂精细刻画的能力为上述 3 类区域划分提供了可能,其前提是确定 L 属性两个合理的阈值。在断裂敏感地震属性中,大尺度断层发育区与其他区域表现特征明显不同。对目的层 L 样点进行了数据统计分析,基于数据统计图(图 7a)。利用 Otsu 算法(即最大类间方差)进行了阈值自动求取,实现了断层发育区的划分(图 7b),断层发育区的识别主要应用于后续的断裂自动提取与构造断裂建模。

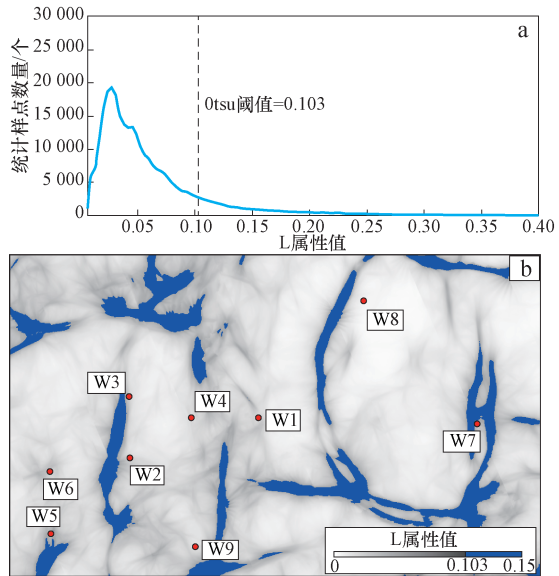


图 7 川西坳陷新场地区计算 L 属性 Otsu 阈值并实现大尺度断层发育区划分

Fig.7 Calculation of the Otsu threshold of likelihood attribute and division of large-scale areas of well-developed faults in the Xinchang area, western Sichuan Depression

a. 基于 L 属性统计信息确定其 Otsu 阈值;b. 利用 Otsu 阈值分割获得的断层发育区范围(深蓝色区域)

为实现裂缝带发育区与断裂弱发育区在L属性中的划分,利用成像测井解释获得的裂缝发育密度与L属性层间均值进行了交会分析(图8a)。交会分析表明,多数井的高角度(倾角 $>60^\circ$)层间裂缝发育密度与L属性层间均值具有一定相关性,表现为线性关系。高角度裂缝更容易产生于挤压应力形成的断层附近。因此推测L属性所反映的裂缝性质更有可能是断层相关裂缝。根据地震属性与成像测井解释裂缝密度交会分析的趋势,当L属性值高于0.037时,地层中更可能发育裂缝。因此本文将0.037定位裂缝带发育区与断裂弱发育区之间L属性值阈值(图8b)。

3.2.3 裂缝密度属性计算

井周围一定范围内的断裂发育程度会对井产量产生影响,通过统计某位置附近样点断裂获得的断裂密度属性有利于指导预测高产气层分布。本文中断裂密度求取基本原理为图2所示,断裂密度的提取基于TL属性。裂缝密度属性提取过程中的关键参数是裂缝密

度提取半径,代表单井产量受多大范围中的裂缝影响。该参数难以定量估算,因此本文评价不同提取半径下求取的裂缝密度与井生产动态之间的相关性,确定该参数。通过尝试了多个裂缝密度提取半径,并将层间裂缝密度均值其与主力生产井累产交会分析,发现当采取500 m为提取半径时,所提取的2砂组与4砂组裂缝密度(图9a与图9b)与生产动态呈现出良好的指数型关系(图9c)。该结论与邻区(四川盆地剑阁地区须家河组)通过测井裂缝评价得到的致密砂岩储层裂缝发育程度对天然气产能影响规律相似^[17]。如果断裂发育程度确实是须二段生产井表现的主控因素,那么这一断裂预测结果将对指导新井部署具有一定指导意义。

4 讨论

断裂模型通常由不同尺度断裂构成。大尺度断裂指地震剖面中可直接识别的大型断裂,决定了油藏基本构造框架;中尺度断裂难以在剖面中直接识别,但可以通过某些地震属性在一定程度上进行预测;小尺度断裂难以通过地震信息刻画。大尺度断裂来源于地震解释人员的手动拾取;中尺度断裂来源于地球物理反演或地震属性优选;小尺度断裂则需要充分利用测井资料采取随机模拟方式获得其空间分布。由此可见,所谓的中、小断裂尺度是由地震解释断裂的极限决定的。中尺度断裂由地震属性或反演提供,属于确定性建模的一种,可靠性比小尺度断裂建模所采取的随机建模更高。提高地震预测断裂精度有利于提高断裂模型整体精度和可靠性。相比于传统常规断裂预测属性,L属性提供了更丰富的断裂的信息(图5,图6),为断裂建模精度的提升提供了可能性。

本文利用Otsu阈值分割法从L属性中实现了断层发育区的识别,并进行了三维空间中断层片的提取(图10)。裂缝片主要方位为NE-SW向与近WE向,与前人基于测井解释的统计结论较为吻合^[15]。采用更高精度的三维断层片表征中、大尺度断裂将明显提升建模精度。L属性可以在一定程度上反映断裂发育的趋势,在实际工作中可进一步尝试将L属性转换为空间中的裂缝属性(如裂缝孔隙度或裂缝渗透率)约束小尺度裂缝的表征。

L属性及其衍生属性在须二段致密气藏断裂预测中取得了一定的成效,但应注意到该方法获得的断裂信息来源于叠后地震数据,尚未体现断裂的空间各向异性。国内已经有利用叠前地震数据预测断裂的成果

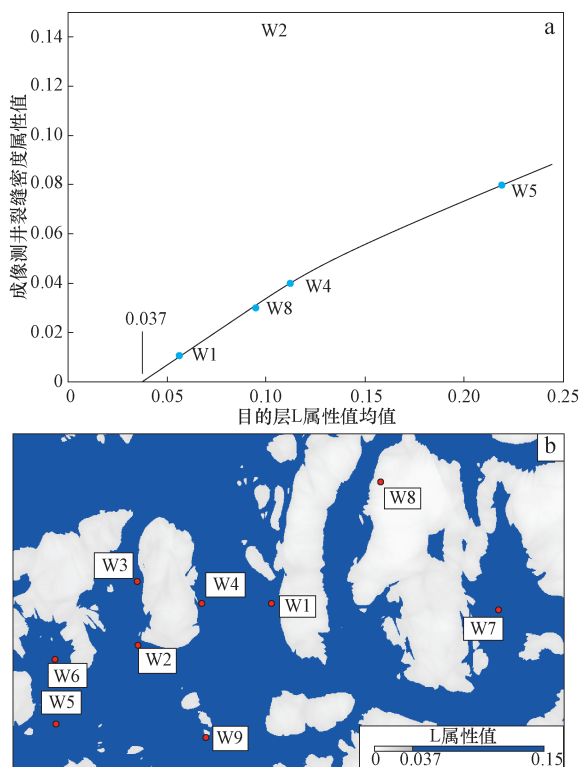


图8 川西坳陷新场地区裂缝解释井-震交会分析及裂缝带发育区识别划分

Fig. 8 Analysis of the intersections between the fracture interpretation from wells and seismic data and identification of areas with well-developed fractures in the Xinchang area, western Sichuan Depression

a. 高角度裂缝(倾角 $>60^\circ$)发育密度与L属性层间均值交会分析;b. 基于成像测井约束得到的阈值所确定的裂缝带发育区范围(深蓝色区域)

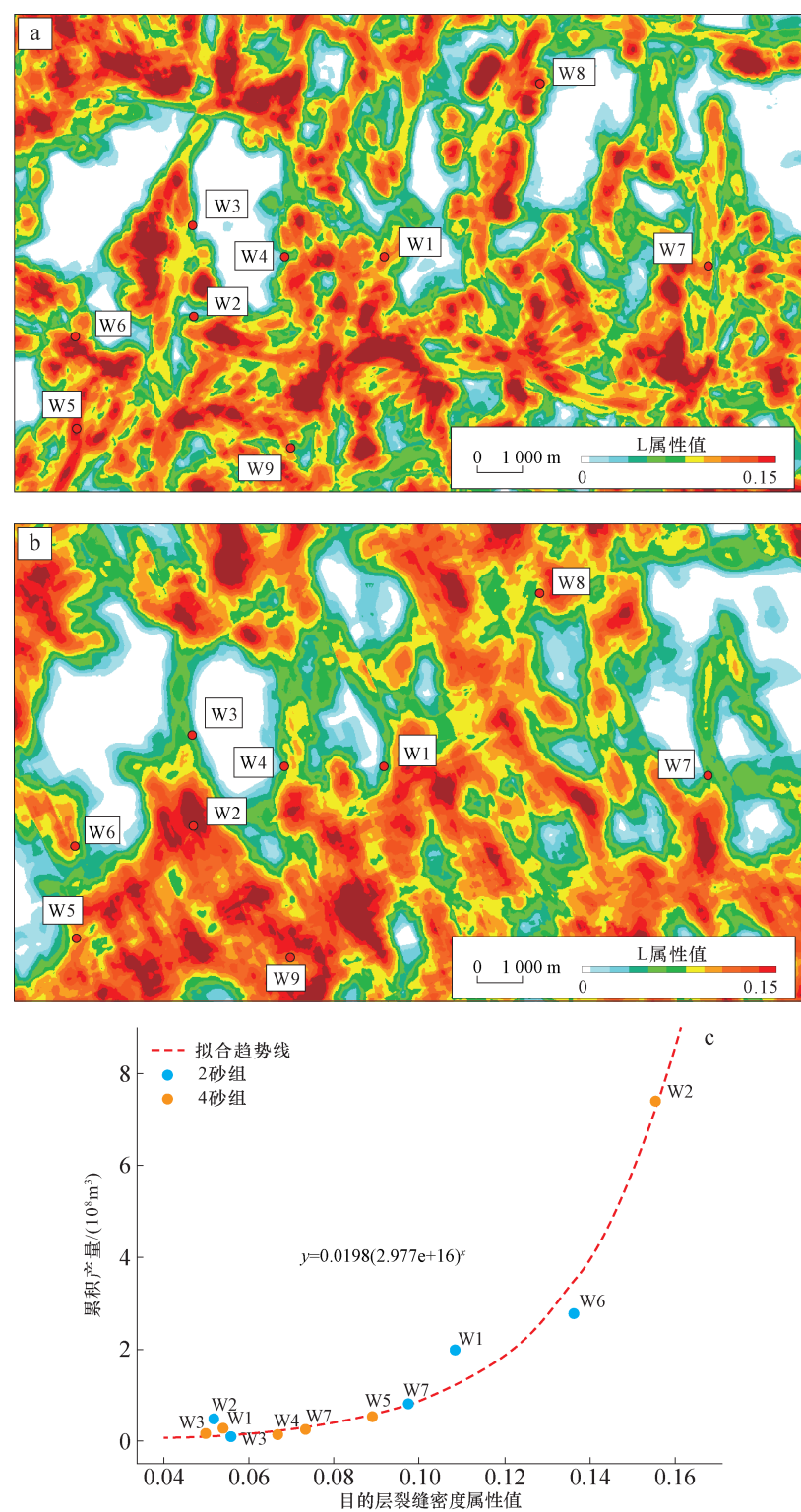


图 9 川西坳陷新场地区须二段 2 砂组与 4 砂组层间平均裂缝密度及其与单井累积产量交会图
Fig. 9 Intersection diagram of average fracture density of No. 2 and No. 4 sandbodies in the Xu 2 member and the cumulative production of single wells in the Xinchang area, western Sichuan Depression
a. 2 砂组层间平均裂缝密度; b. 4 砂组层间平均裂缝密度; c. 层间平均裂缝密度与单井累产交会图

发表。蔡希源等在深层致密砂岩气藏勘探中采用横波分裂属性检测到了小于 5m 尺度的裂缝,并与实钻吻合较好^[17],该方法要求采集横波信息,需要专门配套的采集设备与处理方法,因此尚未得到大规模推广。刘喜武等^[18]提出一套充分利用 AVAZ 信息的小尺度裂缝预测方法,以提高正交各向异性介质中裂缝预测

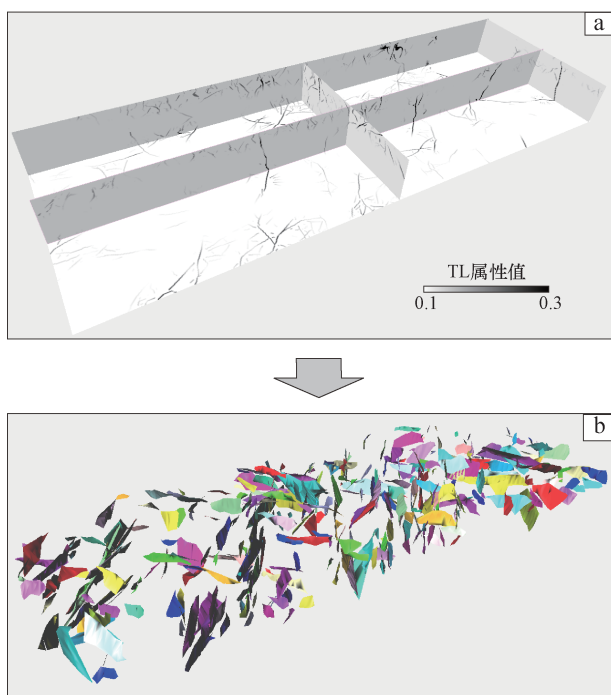


图10 基于TL属性(a)的裂缝片提取(b)

Fig. 10 Fracture planes extracted(b) based on thinned likelihood attribute(a)

精度。刘宇巍等^[19]提出频变AVAZ特征更能反映流体信息和裂缝长度参数,取得了较好的裂缝预测效果。这些成果都表明叠前各向异性信息中包含了小尺度断裂信息。将L属性提取方法引入叠前地震断裂属性计算,并充分利用叠前AVAZ信息对断裂预测进行约束,可能会取得更好的预测效果,并提供更多的断裂描述信息。另一方面,L属性与成像测井密度交汇分析(图8a)显示出L属性对高角度断裂更为敏感,层理缝等低角度缝的识别、气层的综合评价也是甜点预测的必要条件,低角度剪切缝和高角度剪切缝相互交织可形成连通良好的裂缝网络系统^[22-24],将L属性与衰减敏感地震属性结合可能有利于缝网断裂密度的综合预测。

5 结论

1) 相比传统地震断裂预测属性,L属性及其衍生数据体(TL属性和断裂密度属性)有效提升了利用地震对断裂成像的能力。本文建立了一套基于L属性及其衍生属性的适用于致密砂岩气藏的断裂预测流程。

2) 为了实现对不同尺度断裂的区分描述,本文提出利用Otsu阈值自动提取方法确定断层发育区阈值,基于成像测井约束确定裂缝带发育区阈值,对致密气藏空间划分为断层发育区、裂缝带发育区和断裂欠发育区3类。

3) 基于断层发育区提取的三维空间断裂片可以作为断裂框架用于约束油藏裂缝建模。基于TL属性提取的断裂密度属性对生产井表现起到了一定的预测作用。结合气水分布预测和岩性预测,基于L属性的高精度断裂解释有望为高产甜点气层的预测提供可靠基础,为加密井部署或开发方案合理调整提供直接依据。

参考文献

- [1] 康玉柱. 中国非常规油气勘探重大进展和资源潜力[J]. 石油科技论坛, 2018, 37(4): 1-7.
Kang Yuzhu. Significant exploration progress and resource potential of unconventional oil and gas in China[J]. Oil Forum, 2018, 37(4): 1-7.
- [2] 蒋健美. 川西DY地区须家河组裂缝识别方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
Jiang Jianmei. The research on the fracture identification of Xujiahe Formation in DY Region in Western Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Techniques, 2013.
- [3] 赖锦, 王贵文, 黄龙兴, 等. 致密砂岩储集层成岩相定量划分及其测井识别方法[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 128-138.
Lai Jin, Wang Guiwen, Huang Longxing, et al. Quantitative classification and logging identification method for facies of tight sandstones[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 128-138.
- [4] 王永东, 雷俊杰, 樊万红, 等. 延长南部低渗透储层天然裂缝定量识别技术[J]. 断块油气田, 2018, 25(3): 322-327.
Wang Yongdong, Lei Junjie, Fan Wanhong, et al. Quantitative identification of natural fractures in tight reservoir of southern Yanchang Oil-field[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(3): 322-327.
- [5] 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.
- [6] Pedersen S I, Randen T, Sonneland L, et al. Automatic fault extraction using artificial ants[M]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2002, Salt Lake City, Utah, 2002: 512-515.
- [7] Hale D. Fault surfaces and fault throws from 3D seismic images[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012, Las Vegas, Nevada, 2012: 1-6.
- [8] 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 Debo, Zhao Yimin, Zhang Yintao, 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.
- [9] 张木辰, 孟令彬, 杨瑞召, 等. 细化断层概率体及其在煤层气勘探中的应用[J]. 中国海上油气, 2018, 30(1): 67-73.
Zhang Muchen, Meng Lingbin, Yang Ruizhao, et al. Thinned fault likelihood and its application in interpretation of seismic data in coal

- bed methane blocks China offshore Oil and gas[J]. China Offshore Oil And Gas, 2018, 30(1): 67–73.
- [10] 刘忠群, 秦锐, 郝前勇, 等. 涪陵油田长 8 致密油藏地震 Likelihood 裂缝预测[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(5): 12.
- Liu Zhongqun, Qin Rui, Hao Qianrong. Seismic likelihood fracture prediction technology for Chang 8 tight oil reservoir in Jinghe oil field, Ordos Basin, China[J]. Journal Of Chengdu University Of Technology(Science & Technology Edition), 2016, 43(5): 12.
- [11] 蔡希源. 深层致密砂岩气藏天然气富集规律与勘探关键技术——以四川盆地川西坳陷须家河组天然气勘探为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 707–714.
- Cai Xiyuan. Gas accumulation patterns and key exploration techniques of deep gas reservoirs in tight sand stone an example from gas exploration in the Xujiahe Formation of the western Sichuan Depression the Sichuan basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 707–714.
- [12] 蔡勋育, 邱桂强, 孙冬胜, 等. 中国中西部大型盆地致密砂岩油气“甜点”类型与特征[J]. 石油天然气与地质, 2020, 41(4): 684–695.
- Cai Xunyu, Qiu Guiqiang, Sun Dongsheng, et al. Types and characteristics of tight sandstone sweet spots in large basins of central-western China[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 684–695.
- [13] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 1979, 9(1): 62–66.
- [14] 胡明毅, 李士祥, 魏国齐, 等. 川西前陆盆地上三叠统须家河组致密砂岩储层评价[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(4): 456–462.
- Hu Mingyi, Li Shixiang, Wei Guoqi, et al. Reservoir appraisal of tight sandstones of Upper Triassic Xujiahe Formation in the western Sichuan Foreland Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(4): 456–462.
- [15] 张虹, 沈忠民. 超致密裂缝性储层地震预测方法研究——以川西新场气田须二气藏勘探为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, 35(2): 149–157.
- Zhang Hong, Shen Hongmin. Study on seismic prediction methods for super tight fractured reservoirs—An example from the exploration of member 2 of Xujiahe Formation reservoir in Xinchang gas field, Sichuan Basin, China[J]. Journal Of Chengdu University Of Technology(Science & Technology Edition), 2008, 35(2): 149–157.
- [16] 王莹, 张克银, 甘其刚, 等. 四川盆地西部新场地区上三叠统须家河组二段构造裂缝的分布规律[J]. 地质学刊, 2015, 39(4): 543–551.
- Wang Ying, Zhang Keyin, Gan Qigang, et al. Distribution rules of structural fractures in the second member of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Xinchang area western sichuan basin[J]. Journal of Geology, 2015, 39(4): 543–551.
- [17] 吕文雅, 苗凤彬, 张本健, 等. 四川盆地剑阁地区须家河组致密砂岩储层裂缝特征及对天然气产能的影响[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 484–557.
- Lv Wenya, Miao Fengbin, Zhang Benjian, 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): 484–557.
- [18] 葛祥, 张筠, 吴见萌. 川西须家河组致密碎屑岩裂缝与储层评价[J]. 测井技术, 2007, 31(3): 211–215.
- Ge Xiang, Zhang Yun, Wu Jianmeng. Fracture and reservoir evaluation for tight clastic rock of Xujiahe Formation in West Sichuan[J]. Well Logging Technology, 2007, 31(3): 211–215.
- [19] 徐天吉, 程冰洁, 沈忠民. 横波分裂裂缝检测方法在川西深层气藏中的应用[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(4): 1258–1265.
- Xu Tianji, Cheng Bingjie, Shen Zhongmin. Application of fracture detecting methods by shear wave splitting at the depth gas reservoir in West Sichuan[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(4): 1258–1265.
- [20] 刘喜武, 刘宇巍, 刘志远, 等. 页岩层系天然裂缝地震预测技术研究[J]. 石油物探, 2018, 57(4): 611–617.
- Liu Xiwu, Liu Yuwei, Liu Zhiyuan, et al. Seismic prediction of natural fractures in series of shale oil reservoirs[J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2018, 57(4): 611–617.
- [21] 刘宇巍, 董宁, 吴晓明, 等. 频变 AVAZ 响应特征分析及裂缝性质反演方法研究[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(2): 732–740.
- Liu Yuwei, Dong Ning, Wu Xiaoming, et al. Analysis of frequency-dependent AVAZ response attributes and research of fracture properties inversion method[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(2): 732–740.
- [22] 鞠玮, 尤源, 冯胜斌, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组致密砂岩储层层理特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 598–605.
- Ju Wei, You Yuan, Feng Shengbin, et al. Characteristics and genesis of bedding-parallel fractures in tight sandstone reservoirs of Chang 7 oil layer, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 598–605.
- [23] 李虎, 范存辉, 秦启荣, 等. 川东北元坝中部地区须家河组致密储层裂缝特征及成因探讨[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 8(2): 2–6.
- Li Hu, Fan Cunhui, Qin Qirong, et al. Fracture characteristics and its genesis of tight reservoir in Xujiahe formation of central Yuanba area in sichuan basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(2): 2–6.
- [24] 王安龙. 基于常规测井资料综合评价延川南致密砂岩气层[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(2): 75–82.
- Wang Anlong. Comprehensive evaluation of dense sandstone gas layer in southern Yanchuan area based on conventional logging data[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(2): 75–82.

(编辑 张玉银)