

川东北须家河组致密砂岩断缝系统 II: 断层破碎带的结构特征

廖宗湖^{1*}, 凡睿², 李薇¹, 陈伟伦¹, 刘辉¹, 邹华耀¹, 郝芳³

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中国石化勘探分公司, 成都 610041

3 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580

* 通信作者, zonghuliao@163.com

收稿日期: 2020-06-18

中国科学院A类战略性先导科技专项“智能导钻”(XDA14010306)资助

摘要 断层破碎带结构是逐渐而非某次剧烈变化形成的,这也直接导致了破碎带结构几何空间特征的复杂性。通常断层破碎带主要由断层核和破碎带这两个部分组成,但大规模或者构造变形强烈的断层中,断层破碎带可能会由单一断层核演化为具有多个核部的复杂结构。如何获得这样的结构特征,对研究断层破碎带控制下的油气运移规律有重要意义。

基于三维地震方差属性,本文提出对川东北马路背地区须家河组二段致密砂岩的断层破碎带构造形态进行刻画,并对断层破碎带的宽度进行量化分析。结果显示如下:(1)地震方差属性结果展示了地下存在单核断层破碎带和多核复合断层破碎带。本文利用累计方差值的斜率变化点,结合川东北致密砂岩具体情况,选取方差值0.2作为边界值,确定该断层破碎带宽度在700~1200 m之间。(2)数值模拟显示,断层破碎带的形变程度呈指数衰减,即随着离核距离的增加,变形强度减少,这些特征和地表认识一致。(3)通过破碎带宽度量化分析,认为研究区目的层断裂带的宽度表现出极强的不均质性。致密砂岩不仅各断层破碎带之间宽度差异大,断层破碎带宽度在深度上也有明显变化,其结构显示出明显的“层控效应”。

虽然确认断层破碎带宽度仍然依赖于经验取值,但该研究为致密砂岩断层破碎带内部结构解析提供了新的方法和工具,为进一步建立川东北致密砂岩断缝成藏系统提供基础,其断层破碎带构造特征对分析断缝成藏具有重要意义。

关键词 四川盆地;致密砂岩;断缝系统;断层破碎带;地震属性

Fault-fracture systems of the Xujiahe tight sandstone in the Northeast Sichuan Basin, Part II: Structure characteristics of fault damage zones

LIAO Zonghu¹, FAN Rui², LI Wei¹, CHEN Weilun¹, LIU Hui¹, ZOU Huayao¹, HAO Fang³

1 College of Geoscience, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Exploration Branch of Sinopec, Chengdu 610041, China

3 School of Geosciences, China University of Petroleum-Huadong, Tsingdao 266580, China

引用格式: 廖宗湖, 凡睿, 李薇, 陈伟伦, 刘辉, 邹华耀, 郝芳. 川东北须家河组致密砂岩断缝系统 II: 断层破碎带的结构特征. 石油科学通报, 2020, 04: 449-457

LIAO Zonghu, FAN Rui, LI Wei, CHEN Weilun, LIU Hui, ZOU Huayao, HAO Fang. Fault-fracture systems of the Xujiahe tight sandstone in the Northeast Sichuan Basin, Part II: Structure characteristics of fault damage zones. Petroleum Science Bulletin, 2020, 04: 449-457. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.04.039

Abstract The complexity of the fault zone structure is a direct consequence of the superposition of tectonic movements rather than of a single dramatic deformation. In general, the fault damage zone is mainly composed of two parts, the fault core and the damage zones. However, in a large-scale fault or faults with severe tectonic deformation, the fault may evolve from a single fault core into a composite fault structure with multiple fault cores. It is challenging to obtain the structural features of such fault damage zones to understand the subsurface oil and gas migration.

Based on the three-dimensional seismic variance properties, we provide a new interpretation approach and quantify the widths of fault damage zones of the second member of the Xujiahe tight sandstone in the Malubei region of northeastern Sichuan. The results include: (1) the seismic attribute of variance presents faults with a single fault core and composite fault structures with multiple fault cores. According to the turning point of accumulated values of seismic variance statistically, 0.2 is selected as a critical value of variance to define the width of damage zones. The width range is 700~1200 m. (2) numerical simulation shows that the deformation of the fault zone decays exponentially with increasing distance away from the fault core, which is consistent with the understanding of the faults in the outcrops. (3) The quantitative analysis of the width of the fault damage zones shows strong inhomogeneity of the fault zones as the width varies between the fault damage zones. There is also a significant variation in the depth of the same fault, which indicates an obvious "lithologically-controlled effect". This study is limited by selecting empirical values of seismic variance in determination of fault widths.

The result validates this new approach and tools for the structural analysis of fault zones in tight sandstones. It provides a basis for further establishing a fault-fracture system in the Northeast Sichuan basin, and the structural features of the fault zones are of great significance for the analysis of petroleum accumulation and distribution in the tight sandstones.

Keywords Sichuan Basin; tight sandstone; fault-fracture system; fault damage zone; seismic attributes

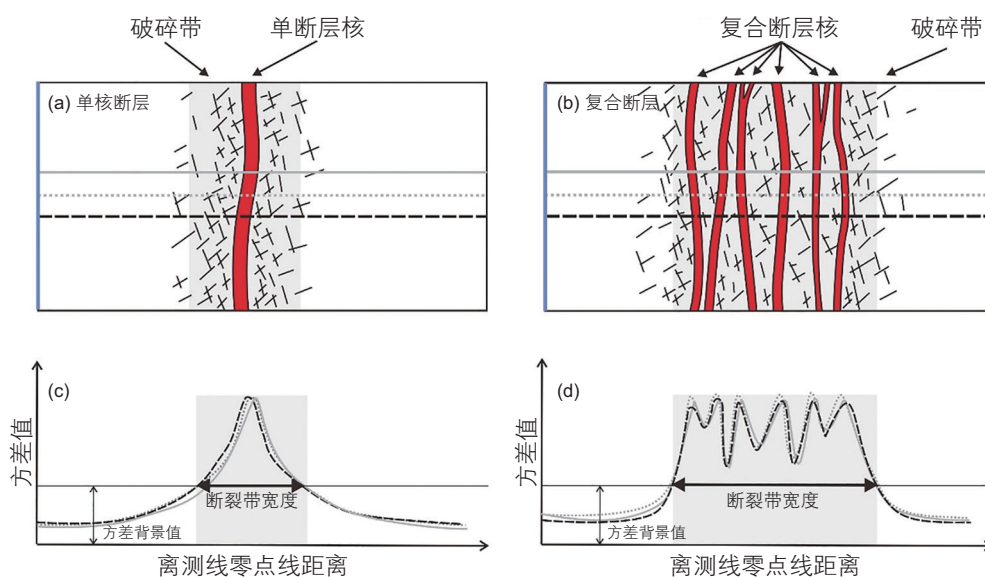
doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.04.039

0 引言

断层在过去一直被简化为一种单一的平面结构,但是随着研究的深入,发现它们其实是由各种复杂结构构成的一种立体区域(图1)^[1-3]。断层破碎带在很多地质领域的研究当中一直被视为关键因素,比如和断层相关的地层变形过程、区域应力分布和构造演化史、

地震破裂传播和地壳中流体的渗流等^[1-2]。断层破碎带通常伴生有复杂的裂缝系统^[4-5],不仅是地下油气运移重要通道,也可能为一些致密储层提供了储集空间,影响着油气藏的富集和分布规律^[3,6-10]。

前人研究结果表明^[3,5],断层破碎带结构是逐渐而非某次剧烈变化形成的,这也直接导致了破碎带结构在几何空间上的复杂性。已有不少学者较详细地描



(a) 单断层核断层破碎带和(b) 多断层核的复合断层破碎带及其对应的地震方差属性信号模型(c)和(d),红色代表断层核,灰色代表破碎带区间

图1 断层破碎带量化模式示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of quantitative model of fault damage zone

述了断裂带的结构特征,认为断裂带主要由断层核和破碎带这两个部分组成^[1],这两个部分组成的区域又常称为断层破碎带,且以一定的背景变形强度和周围的岩石区分开来(图 1a, 1c)。断层核内部发育有断层泥、角砾岩等成分,是强烈局域应变和强烈剪切的结果。破碎带主要发育小断层、裂缝等次级构造,其整体表现出相较于断层核明显较低的应变和较小的变形、相较于围岩较强的构造变形。但是在某些情况下,比如大规模或者构造变形强烈的断层中,断层几何形态复杂。此时,上文提到的简单的断层结构的定义不能满足要求。因此, Jones 等(1996)认为^[11-12],应根据断层不同的规模、不同的岩性特征和构造背景对断层破碎带模型进行分类和详细描述。Berg 等(2005)具体建议应该将断层核和破碎带根据变形情况分别进一步划分,比如将断层核分为中心核和远端核,将破碎带分为内部破碎带和外部破碎带^[13-14]。在某些情况下,在破碎带和断层核的边界以及破碎带和围岩的边界可以观察到较明显的过渡区或混合区。Faulkner 等(2010)研究表明断层破碎带可能是单一核,也可能具有多核的复杂结构(图 1b, 1d)^[1,3]。Brogi (2008)和 Kristensen(2016)等人^[15-16]还通过断层裂缝发育程度的变化情况量化了破碎带的宽度,发现断层两盘的破碎带区域呈现不对称性,不仅破碎带的宽度不相同,破碎强度也不一致。

为了探索断层破碎带这样的复杂结构,本文选取对断层破碎带最敏感的三维地震方差属性,在马路背地区须家河组二段致密砂岩的断层破碎带的多属性分析基础上(廖宗湖等, 2020, 见本刊^[17]),对目标层的重点断层破碎带结构进行分析,也对其层控特征进行初步解析。该研究为地下断层破碎带内部结构解析提供了工具,也是建立川东北致密砂岩断缝成藏系统的基础。

1 研究方法

地震的方差属性是通过计算地震道波形之间方差来形容道与道之间的差异程度,以此检测地下断层的发育情况^[3]。这种方差属性的方差值是量化的,通过加权归一化处理后方差值介于 0~1 之间,在断层发育区,构造变形越强烈的地方,相邻道之间的波形差异越大,方差越高,其值越接近于 1。基于以上理论, Liao 等(2019)提出了利用方差属性值量化断层破碎带宽度的方法^[3,18-20]。图 1 为断层破碎带结构平面或剖面示意图,其中图 1a 为单核断层,图 1b 为复合断层(多

个断层核)。图中红色表示断层核发育的区域,灰色表示破碎带发育的区域。那么图中断层破碎带宽度基于方差属性值的具体量化方法为:①在距离破碎带合适的位置选择一条基线(图 2 下图蓝线),该基线需要平行于所量化的断层带局部延伸方向。②以该基线为起点作适量测线垂直于断层破碎带,测线之间的距离不宜过大。③在每条测线上选择一定的间隔取适量的测点。④以测点离基线的距离为横坐标,测点的方差值为纵坐标,制作每条测线距离一方差值的变化曲线。⑤选择合适的破碎带和围岩的方差边界值(背景值)以确定断层具体宽度。

2 结果与分析

2.1 断层破碎带的结构识别

由马路背地区须二段地层的方差属性图可以看出

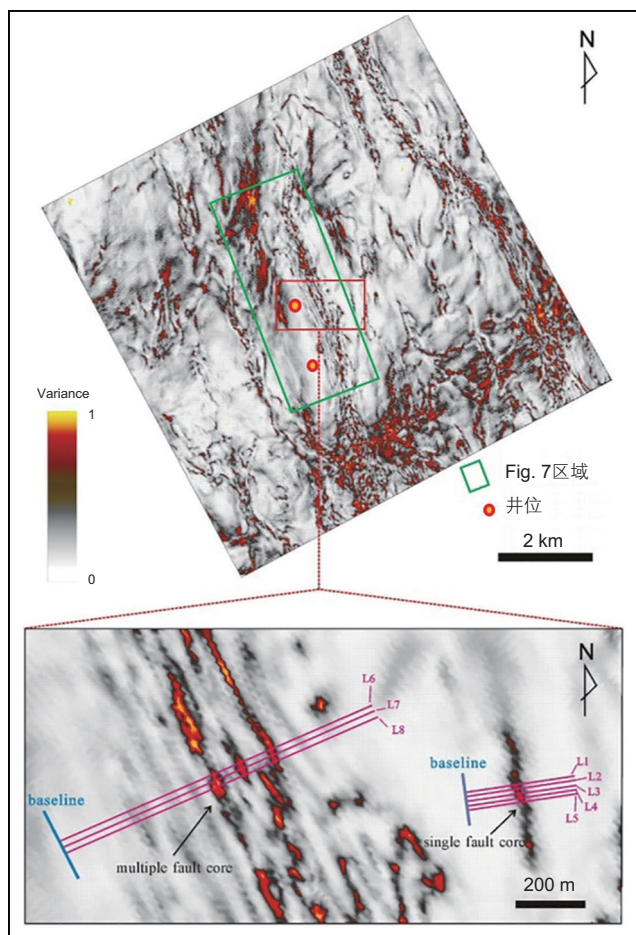


图 2 局部单核、多核断层在须家河组二段顶层方差属性图中位置

Fig. 2 The location of local single core and multiple cores fault in the variance attribute map on the top of T_{3x^2}

(图2), 研究区主要断层破碎带的断层核表现出多个断层核的复合特征, 且多个断层核之间也表现出断开、交叉、扭曲等复杂的结构, 仅有部分次生小断层表现为单断层核形态。本文选择局部断层核形态较清晰的部分为例进行进行量化分析; 图2右下角处于通南巴背斜侧翼构造低部位, 本文不做分析。其中L1~L5为单核断层破碎带的测线, L6~L8为多核断层破碎带的测线。图3展示了沿每条测线上方差值的变化曲线。

从图中可以看出: 具有单个断层核的断层破碎带量化曲线表现出明显的单峰特征, 而具有多个断层核的复合断层破碎带表现出明显的多峰特征^[17](图3中粉色区域), 且越靠近断层核的位置, 方差峰值相对而言越高。

破碎带和围岩的方差边界值(背景值)的选择对量化断层破碎带的宽度尤为重要。这里沿用累计裂缝密度的方法, 通过使用累计方差值, 将累计方差值曲

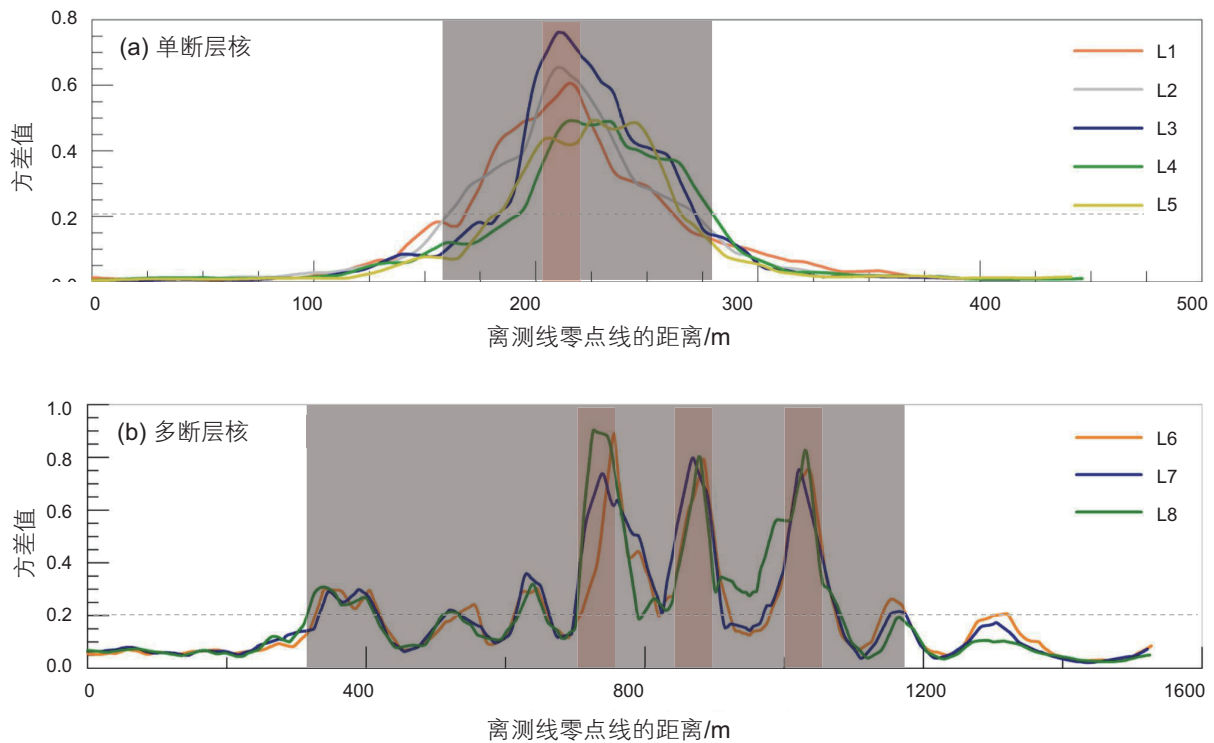


图3 局部单核、多核复合断层方差属性值分布图^[17]

Fig. 3 Local single core and composite fault (with multiple cores) variance value distribution maps^[17]

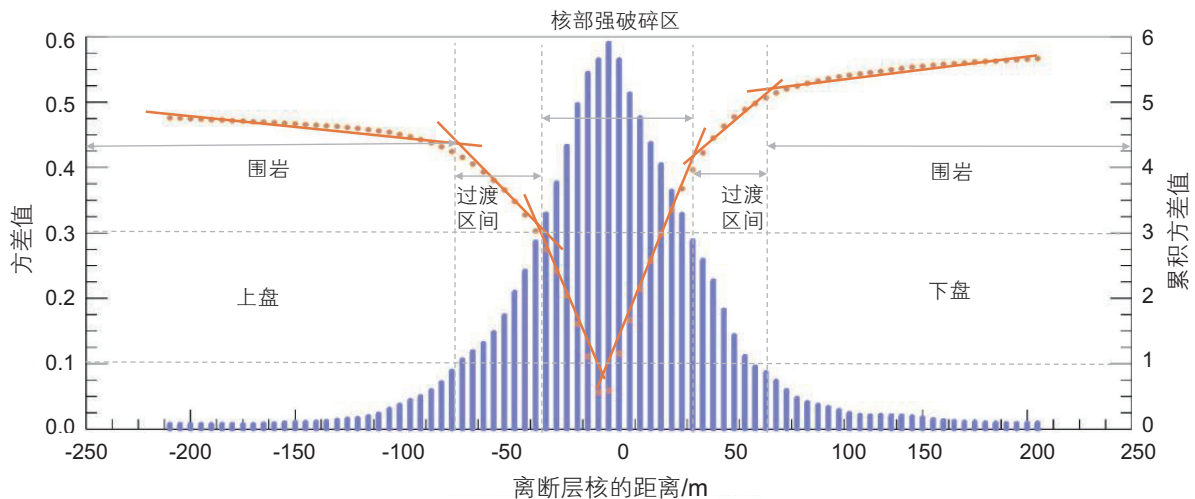


图4 局部单核断层方差值和累积方差值与断层核距离的关系

Fig. 4 Relationship between local single core fault variance value/cumulative variance value and fault core distance

线斜率突然降低的地方视为破碎带和围岩的边界, 该地方的方差值作为背景值。我们使用单核断层测线 L1~L5 的平均值分别作断层两盘方差值和累计方差值随断层核距离变化的曲线(图 4)。这里的坐标原点为断层核而非测线基线, 其中断层核的选取为每条曲线的方差最高值。从累计方差值斜率的变化特征可以看出, 在断层两盘分别有两个不同梯度的斜坡交点, 将该量化区域分为三个带: 中高方差值的强破碎带(约为 100 m)、中低方差值的过渡带(断层两盘都约为 80 m)、特低方差值的围岩带。理论上, 该处背景值应处于过渡带与围岩交界的方差值(0.1)和过渡带与强破碎带交界的方差值(0.3)之间, 这种选择方法可以在一定程度上减少人为主观定义断层破碎带的边界的差异导致的破碎带宽度的变化。因为整个工区主要断层带周围的背景裂缝较多, 不宜选择过低的背景值进行量化, 所以本文选择方差值 0.2 作为破碎带的边界值。但这里的方差值 0.2 仍然是经验取值。

根据边界值 0.2, 可以在“测点离基线的距离—

方差值”坐标系中得到单核和复合断层破碎带的宽度(图 3)。其中, 单核破碎带宽度为 125 m, 复合断层带的宽度为 850 m。两个断层破碎带比较, 可以发现随着离破碎最严重的区域(峰值区)距离增加, 破碎强度逐渐减弱(方差值逐渐降低), 且在开始的时候减弱速度较快, 一段距离后, 减弱速度降低。这些规律和我们之前的研究成果一致^[3,17-18]。

2.2 变形程度和断层核距离的关系

为了进一步研究破碎程度随着离断层核距离的增加而降低的规律, 我们对单核断层和典型的复合断层的方差数据进行初步的数值分析。首先分别求取 L1~L5、L6~L8 方差的平均值, 然后以离基线距离为横坐标, 平均方差值为纵坐标作散点图, 对每个断层核两边的方差值进行函数拟合(图 5), 拟合结果显示指数模型的效果好, 其拟合优度总体上都在 0.9 以上。

根据图 5 中对局部单核、复合断层的指数函数拟合结果, 可以分别用一个分段函数来表示该局部单核、

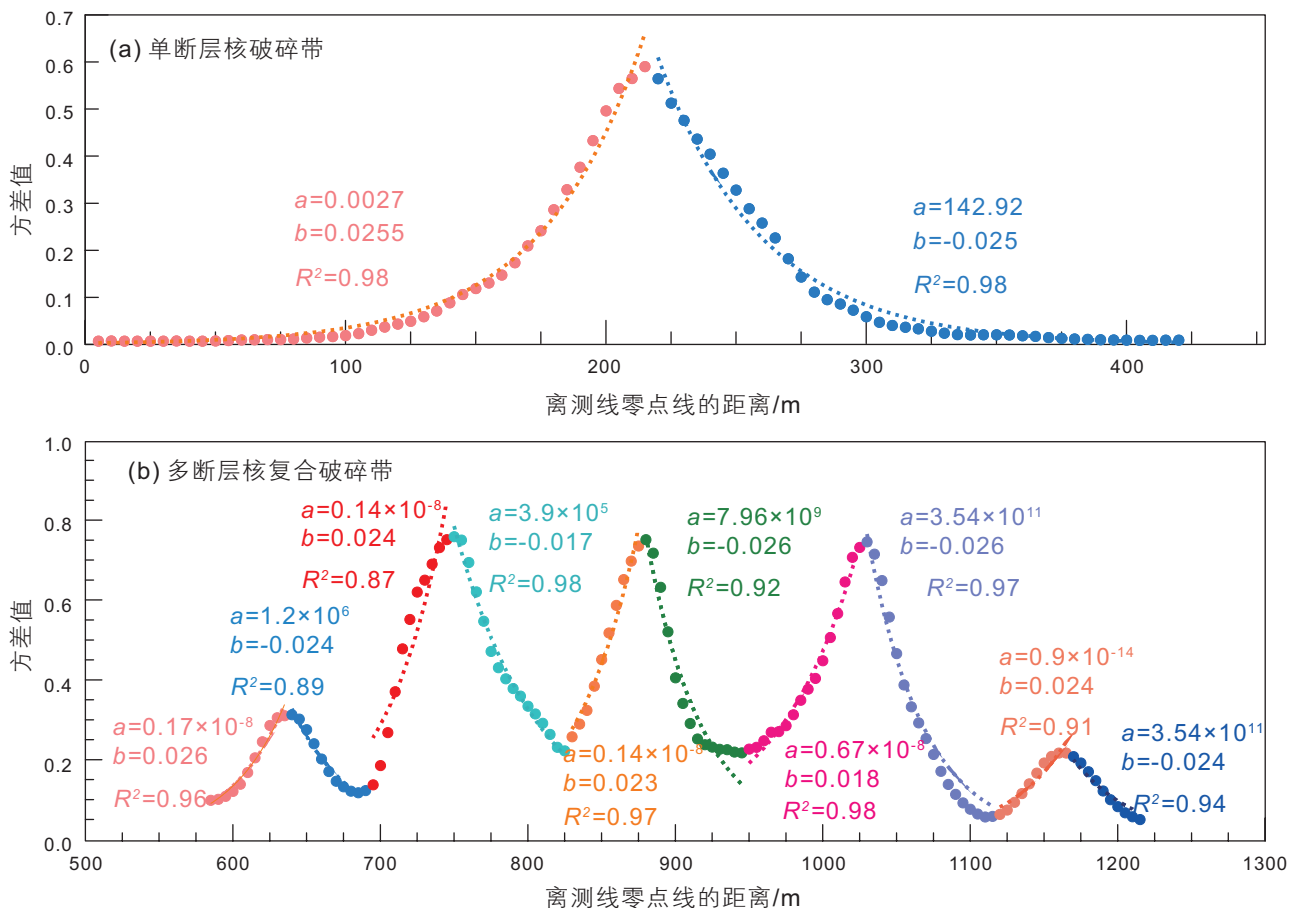


图 5 方差平均值和距断层核距离的关系图(注: a,b 为破碎带方程参数, 见式(1)和(2))

Fig. 5 Relationship between average variance value and distance from fault core (Note a and b are parameters for damage zones as indicated by Eqs. (1) and (2))

复合断层方差值随离基线距离增加的变化情况。特别地，虽然该局部多核断层的断层核有三个，但是其方差峰值大于三个，且在远中心的峰值远远低于中心、近中心处的峰值。这里根据实际情况选择5个峰值，10个指数函数来表征该多核断层的方差变化情况。综上，单核、多核复合断层的方差值 v 和离基线距离 d 的函数关系分别如式(1)和式(2)所示。

$$v(\text{single core}) = \begin{cases} (0.0027)e^{(0.0255d)} & (d \leq 215 \text{ m}) \\ (142.92)e^{(-0.025d)} & (d \geq 215 \text{ m}) \end{cases} \quad (1)$$

$$v(\text{cores}) = \begin{cases} (0.17 \times 10^{-8})e^{(0.026d)} & (d \leq 635 \text{ m}) \\ (1.2 \times 10^6)e^{(-0.024d)} & (635 \text{ m} < d \leq 690 \text{ m}) \\ (0.14 \times 10^{-8})e^{(0.024d)} & (690 \text{ m} < d \leq 745 \text{ m}) \\ (3.9 \times 10^5)e^{(-0.017d)} & (745 \text{ m} < d \leq 825 \text{ m}) \\ (0.14 \times 10^{-8})e^{(0.023d)} & (825 \text{ m} < d \leq 875 \text{ m}) \\ (7.96 \times 10^9)e^{(-0.026d)} & (875 \text{ m} < d \leq 945 \text{ m}) \\ (0.67 \times 10^{-8})e^{(0.018d)} & (945 \text{ m} < d \leq 1025 \text{ m}) \\ (3.54 \times 10^{11})e^{(-0.026d)} & (1025 \text{ m} < d \leq 1115 \text{ m}) \\ (0.9 \times 10^{-14})e^{(0.024d)} & (1115 \text{ m} < d \leq 1165 \text{ m}) \\ (3.54 \times 10^{11})e^{(-0.024d)} & (d \geq 1165 \text{ m}) \end{cases} \quad (2)$$

我们可以比较容易地将以上特例的函数关系推广至一般情况。如图6所示，若某个断裂带有 n 个断层核($n \geq 1$)，第一个断层核和基线之间的距离为 D_1 ，第二个断层核和基线之间的距离为 $D_2 \dots$ 第 n 个断层核和基线之间的距离为 D_n ，且第一个断层核与第二个断层核之间方差值的最小之处和基线的距离为 D_{12} ，第二个断层核与第三个断层核之间方差值的最小之处和基线的距离为 D_{23} ，……，第 $n-1$ 个断层核与第 n 个断层核之间方差值的最小之处和基线的距离为 $D_{(n-1)n}$ 。

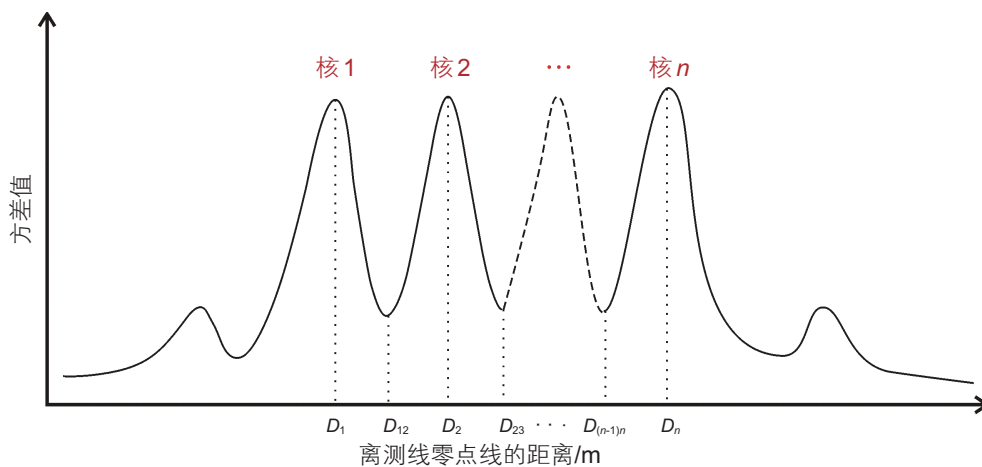


图6 方差值和距断层核距离关系示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the relationship between the variance value and the distance from the fault core

在该坐标系内，若某点离基线的距离为 d ，则该点的方差值和的函数关系为：

$$v = f(d) = \begin{cases} a_1 e^{b_1 d} & (0 < d < D_1) \\ a'_1 e^{b'_1 d} & (D_1 < d < D_{12}) \\ a_2 e^{b_2 d} & (D_{12} < d < D_2) \\ \dots\dots\dots \\ a_n e^{b_n d} & (D_{(n-1)} < d < D_n) \\ a'_n e^{b'_n d} & (D_n < d) \end{cases} \quad (3)$$

其中， a 、 b 是和岩层物理性质或者该处所受应力强弱有关的常数。

至此，我们得出一个基本由多个指数函数组成的分段函数，来描述在“测点离基线的距离—方差值”坐标系方差值具体的变化规律，这个函数本质上描述了随着离断层核距离的增加，破碎程度呈指数函数的趋势减小。

2.3 断裂带的纵向分布特征及层控效应

基于上述对于断裂破碎带的定量研究，Liao等(2019)^[3]利用地震相干属性通过提取不同地层的断层两侧的相干值来研究断裂带的垂向分布特征。在这里，我们使用地震方差属性来研究高产井马101井附近断层破碎带的垂向分布特征。

首先，我们对马路背地区断层块中不同深度F3破碎带的宽度进行了量化，在方差属性平面图的顶部，沿着断层走向分布了多条测量线，根据测量线的方差分布，刻画不同层位的断裂发育情况，并显示了该级别裂缝区域的大致分布位置。

随后，对须二段内部的断裂带分布进行了研究。我们可以看到内部的破碎带更加发达，破碎带更宽

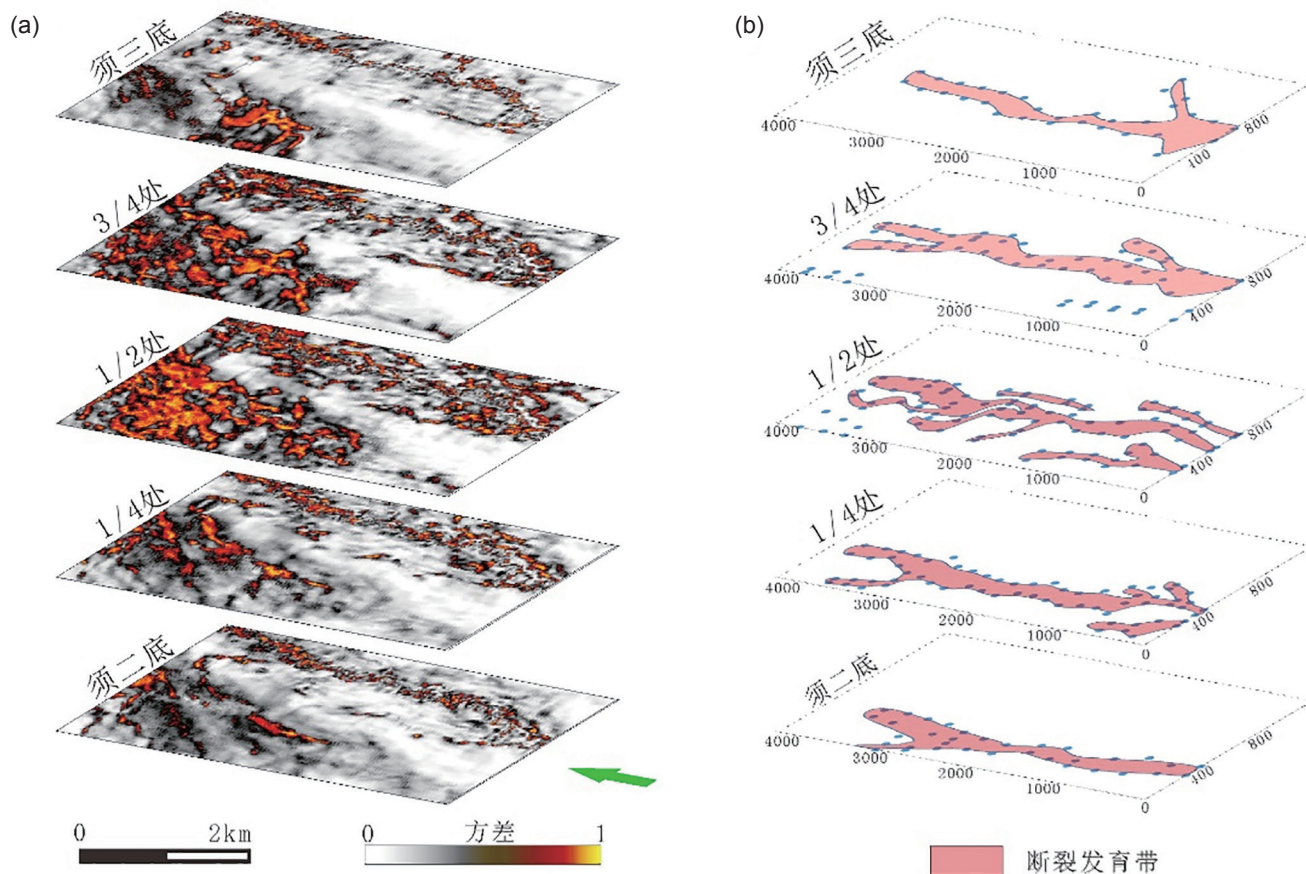


图7 须二段内部F3断层破碎带分布图(截取区间见图2绿框;图b中数字代表空间距离,单位m)

Fig. 7 Fault damage zone distribution of F3 within Xu2 Formation(Area extracted from green box, Fig. 2; Numbers in Fig. b represents relative distance/m)

(图7)。据此刻画须二段不同层位断层破碎带的宽度,发现须二段中部的破裂强度比上下两个部分更明显,并且裂缝也更加发育(图7b)。根据方差值的高值范围确定断层断裂带的宽度,并表征断层形态从须二段顶部到底部的变化。破裂更显著时,裂缝区域的宽度越大,在一定程度上表明裂缝区域的动态蔓延过程。根据经验背景值0.2确定断层破碎带的宽度为700~1200 m(图8a)。不同的破碎带宽度充分体现了断层在破裂扩展过程中在不同地层产生不同的破裂形变程度。总体变化规律是断层破碎带宽度从上到下逐步变小,可能代表着断层破裂最剧烈的中心点在研究区上方^[21]。然而,这种破碎带的宽度变化,更多代表着研究区须二段致密砂岩内部存在力学性质的差异性。须家河组须二段和须四段都是脆性致密砂岩,须三和须五是具有一定塑性的泥页岩,这些地层的力学差异在主断层破裂过程中产生了不同的变形区间,进而出现了“层控特征”。总体来说,致密砂岩地层具有较宽的破碎带,而泥页岩则较窄,这些层控特征直接影响着断层破碎带的空间立体分布^[3]。

基于上述方差属性数据及相关分析结果和平面分布结果,本文刻画了马路背区块断裂带的立体示意图(图8b),图中用红色阴影部分表示断层破碎带发育区,彩色虚线表示须二段不同层位断裂破碎带的宽度变化情况。由此可以看出,破碎带伴生的裂缝和背斜顶部的裂缝带是须二段重要的储集空间。

2.4 局限性分析

本文基于属性的量化模型相较于地表裂缝测量的方法具有明显优势。首先这种量化模型适用于地下的断裂破碎带宽度量化;其次,由于方差属性值是由地震数据中计算得到,所以这种方差值大小不受人为因素影响,更加客观;此外,因为方差的数据在工区范围内随处可取,所以理论上是可以计算目标断层在空间任何位置的破碎带宽度。

但是问题同样存在,如对断层局部破碎带宽度没有统一定义。本文是以局部位置的破碎带宽度平均值作为该断层破碎带的宽度,而也有学者以局域范围内的最大宽度作为该断层的破碎带宽度^[3]。还有更重要的

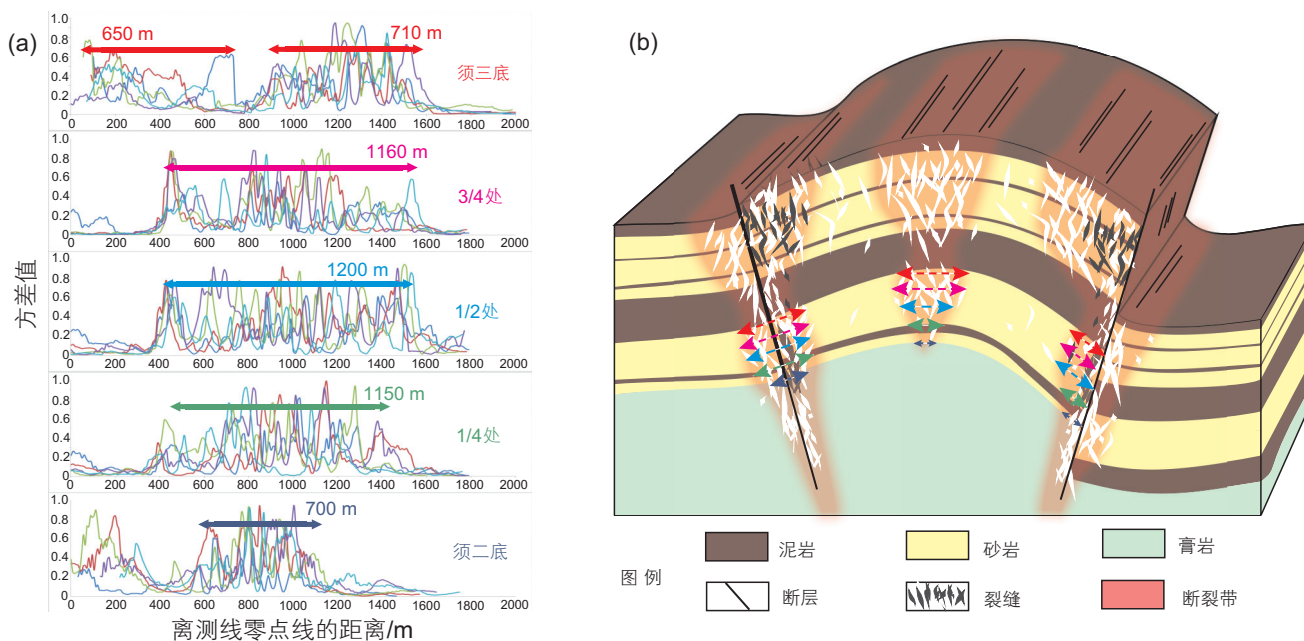


图8 (a)通南巴地区断裂破碎带不同地层宽度和(b)断缝系统模式图

Fig. 8 (a) Widths of fault damage zones for various beds and (b) Geological model of fault-fracture system in Tongnanba anticline

一个问题是关于破碎带和围岩的方差边界值(背景值)的选择。因为所有的物理性质都是逐渐而不是突然变化,所以精确识别破碎带与围岩之间的边界较困难。本文采取的方法和地表露头研究方法有所类似,即采用裂缝的累计密度曲线的斜率表示破碎带裂缝数量的变化率,把该曲线斜率突然降低的位置作为破碎带和围岩的边界^[14]。但是该方法受限于地震资料的品质,对小于100m的断层破碎带难以刻画。

3 结论

本文基于三维地震属性技术刻画马路背地区须家河组二段致密砂岩的断层破碎带,并基于方差属性对工区内的主要断层破碎带宽度进行量化分析,得出如下认识:

(1)工区断层破碎带的结构可以分为单核断层破碎带和多个核部的复合断层破碎带。结果显示,无论是在断层破碎带和围岩之间、还是断层核与断层核之间,随着离核距离的增加,变形强度都呈指数衰减。

(2)基于方差属性量化断裂带宽度的难点在于破碎带和围岩边界值的选取。本文利用累计方差值的斜率变化点,结合川东北致密砂岩具体情况,选取方差值0.2作为边界值,确定该断层破碎带宽度在700~1200m之间,但该值仍然具有人为主观性,属于经验取值。

(3)通过破碎带宽度量化分析,认为研究区目的层断裂带的宽度表现出极强的不均质性。致密砂岩不仅各断层破碎带之间宽度差异大,对该区主要断层破碎带宽度分析显示,断层破碎带宽度在深度上也有明显变化,其结构显示出明显的“层控效应”。这些构造特征对构建该区致密砂岩断缝成藏体系具有重要意义^[22-24]。

参考文献

- [1] FAULKNER D R, JACKSON C A L, LUNN R J, et al. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones[J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32(11): 1557-1575.
- [2] SHIPTON Z K, COWIE P A. A conceptual model for the origin of fault damage zone structures in high-porosity sandstone[J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(3): 333-344.
- [3] LIAO Z, LIU H, CARPENTER B M, et al. Analysis of fault damage-zones by using 3D seismic coherence in Anadarko Basin, Oklahoma [J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103: 1771-1785.

- [4] ELLIS M A, LAUBACH S E, EICHHUBL P, et al. Fracture development and diagenesis of Torridon Group Applecross Formation, near An Teallach, NW Scotland: Millennia of brittle deformation resilience [J]. *Journal of the Geological Society*, 2012, 169: 297–310.
- [5] BUSETTI S, MISH K, HENNINGS P, et al. Damage and plastic deformation of reservoir rocks-Part 2: Propagation of a hydraulic fracture [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96: 1711–1732.
- [6] SAUL C J, EVANS J P, FORSTER C B. Fault zone architecture and permeability structure[J]. *Geology*, 1996, 24(11): 1025–1028.
- [7] CELLO G, TONDI E, MICARELLI L, et al. Fault zone fabrics and geofluid properties as indicators of rock deformation modes[J]. *Journal of Geodynamics*, 2001, 32(4): 543–565.
- [8] GODDARD J V, EVANS J P. Chemical changes and fluid-rock interaction in faults of crystalline thrust sheets, northwestern Wyoming, U. S. A[J]. *Journal of Structural Geology*, 1995, 17(4): 533–547.
- [9] BROGI A. Fault zone architecture and permeability features in siliceous sedimentary rocks: Insights from the Rapolano geothermal area (Northern Apennines, Italy)[J]. *Journal of Structural Geology*, 2008, 30(2): 237–256.
- [10] FU X F, LAN X, MENG L D, et al. Characteristics of fault zones and their control on remaining oil distribution at the fault edge: a case study from the northern Xingshugang Anticline in the Daqing Oilfield, China[J]. *Petroleum Science*, 2016, 13(3): 418–433.
- [11] JONES G, KNIPE R J. Seismic attribute maps; application to structural interpretation and fault seal analysis in the North Sea Basin[J]. *First Break*, 1996, 14(1142).
- [12] CLAUSEN M, KURTH F. A unified approach to content-based and fault-tolerant music recognition [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2004, 6(5): 717–731.
- [13] HEYNEKAMP M R, GOODWIN L B, MOZLEY P S, et al. Controls on fault-zone architecture in poorly lithified sediments, Rio Grande Rift, New Mexico: Implications for fault-zone permeability and fluid flow[M]. *Faults and Subsurface Fluid Flow in the Shallow Crust*. American Geophysical Union, 2013.
- [14] BERG S S, SKAR T. Controls on damage zone asymmetry of a normal fault zone: Outcrop analyses of a segment of the Moab fault, SE Utah[J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27(10): 1803–1822.
- [15] KRISTENSEN T B, ROTEVATN A, PEACOCK D C P, et al. Structure and flow properties of syn-rift border faults: The interplay between fault damage and fault-related chemical alteration (Dombjerg Fault, Wollaston Forland, NE Greenland)[J]. *Journal of Structural Geology*, 2016, 92: 99–115.
- [16] BROGI A. Fault zone architecture and permeability features in siliceous sedimentary rocks: Insights from the Rapolano geothermal area (Northern Apennines, Italy) [J]. *Journal of Structural Geology*, 2008, 30(2): 237–256.
- [17] 廖宗湖, 陈伟伦, 李薇, 等. 川东北须家河组致密砂岩断缝系统 I: 断层破碎带的平面分布特征[J]. *石油科学通报*, 2020, 5(4). [LIAO Z H, CHEN W L, LI W, et al. Fault-fracture system for Xujiahe tight sandstone in Northeast Sichuan Basin, Part I: Distribution of fault damage zones[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(4).
- [18] LIAO Z, LI W, ZOU H, et al. Composite damage zones in the subsurface [J]. *Geophysical Journal International*, 2020, 222: 225–230.
- [19] LIAO Z, HU L, HUANG X, et al. Characterizing damage zones of normal faults using seismic variance in the Wangxuzhuang oilfield, China [J]. *Interpretation*, 2020, 8(4): [http://dx. doi. org/10.1190/INT-2020-0004.1](http://dx.doi.org/10.1190/INT-2020-0004.1).
- [20] LIAO Z, CHEN W, CHEN X, et al. Multiscale fracture and damage zone characterization in a tight sandstone reservoir, Sichuan Basin, China [J]. *Interpretation*, 2020, 8(4): 1–11.
- [21] SCHOLZ C H, COWIE P A. Determination of total strain from faulting using slip measurements[J]. *Nature*, 1990, 346(6287): 837–839.
- [22] 樊靖宇, 秦启荣, 苏培东. 通南巴构造带裂缝成因研究[J]. *特种油气藏*, 2009, 16(1): 38–41. [FANG J Y, QIN Q Y, SUI P D. Fracture genesis in Tongnanba structural belt[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2009, 16(1): 38–41.]
- [23] 龙胜祥, 郭彤楼, 刘彬, 等. 通江—南江—巴中构造河坝飞仙关组三段、嘉陵江组二段气藏形成特征研究[J]. *地质学报*, 2008, 82(3): 338–345. [LONG S X, GUO T Y, LIU B, et al. Gas-Pool Characteristics of the Second Section of the Jialingjiang Formation and the Third Section of the Feixianguan Formation in the Heba area of Tongjiang-Nanjiang-Bazhong Structure Belt, North Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(3): 338–345.]
- [24] 孙爽, 赵淑霞, 侯加根, 等. 致密砂岩储层多尺度裂缝分级建模方法——以红河油田 92 井区长 8 储层为例[J]. *石油科学通报*, 2019, 4(01): 11–26. [SUN S, ZHAO S, HOU J, et al. Hierarchical modeling of multi-scale fractures in tight sandstones: A case study of the eighth member of the Yanchang formation in wellblock 92 of the Honghe oilfield[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 4(01): 11–26.]