

# 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

廖宗湖<sup>1\*</sup>, 陈伟伦<sup>1</sup>, 李薇<sup>1</sup>, 刘辉<sup>1</sup>, 邹华耀<sup>1</sup>, 郝芳<sup>2</sup>

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 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** 断层破碎带通常伴生有复杂的裂缝系统, 为地下流体渗流提供了重要通道, 影响着油气、矿产、地下水等的储存。迄今为止, 地下断层破碎带特征的研究因缺乏数据而相对较少。依托三维地震勘探资料, 本文提取了振幅剖面、极大和极小曲率属性、方差等地震属对通南巴马路背地区须家河组致密砂岩断层破碎带的平面分布特征进行研究。结果显示通南巴背斜在不同时期受到来自不同方向不同强度应力的综合作用, 形成现今的北东向的背斜主体, 并叠加有一系列北西向的次生褶皱和断层破碎带。工区范围内主要有6条NNW向逆断层破碎带, 包括3条延伸超过10 km的长断层破碎带, 和3条延伸3~6 km的较短断层破碎带。这些断层破碎带在走向上宽度差异明显, 破碎范围在270~1250 m, 是该地区的断缝系统主要组成部分。高产井Ma101和Ma201处于F2、F3断层破碎带之间的构造高部位, 断缝成藏优势明显。其中F2断层为通源断裂, 可以沟通下部海相气源; 而其他区域虽也有处于断块两背斜之间的区域, 但处于构造低部位, 并且离大断层较远, 断缝成藏优势较不明显。本文为地下断层破碎带平面分布特征的描述提供了地震多属性分析方法, 对建立致密砂岩地下断缝系统和相应的油气富集成藏模式有重要作用。

**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 Xujiache tight sandstone in the Northeast Sichuan Basin, Part I: Distribution of fault damage zones

LIAO Zonghu<sup>1</sup>, CHEN Weilun<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>, ZOU Huayao<sup>1</sup>, HAO Fang<sup>2</sup>

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

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

**Abstract** Fault damage zones are often associated with complex fracture systems that provide important pathways for subsurface fluid migration, affecting oil and gas reservoirs, mineral deposits, groundwater, etc. To date, subsurface fault characterization has been relatively limited due to lack of data. The purpose of this paper is to characterize the planar distribution of the damage zones

引用格式: 廖宗湖, 陈伟伦, 李薇, 刘辉, 邹华耀, 郝芳. 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. 石油科学通报, 2020, 04: 441-448

LIAO Zonghu, CHEN Weilun, LI Wei, LIU Hui, ZOU Huayao, HAO Fang. Fault-fracture systems of the Xujiache tight sandstone in the Northeast Sichuan Basin, Part I: Distribution of fault damage zones. Petroleum Science Bulletin, 2020, 04: 441-448. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.04.038

of the reverse fault systems on top of the Xujiahe tight sandstone in the Malubei area of Tongnan by using three-dimensional seismic attributes. The seismic attributes include, maximum and minimum curvature attributes, seismic variance, and complementary amplitude profiles.

The results show that the Tongnanba anticline was subjected to the superimposed effects of several tectonic movements, forming the present-day north-east anticline with a series of secondary north-west folds and fault fragmentation zones. Six NNW-trending fault damage zones were identified in the study area. There are three fault damage zones with lengths >10 km, and three shorter ones with lengths of 3~6 km. Each of the damage zones has a different width of between 270~1250 m, as an important part of the fault-fracture system in the area. The analysis indicates that both Ma101 and Ma201 are in the structural-high parts surrounded by the large faults (F3, F6), with the advantage of a fracture network. The fault F2 may be a source-reservoir pathway and in communication with the lower marine phase, while the other regions lack accumulation potential as they are located far away from faults and in a lower part of the structure. This paper provides a new approach to the identification and depiction of geometrical patterns of subsurface fault damage zones through the analysis of multiple seismic attributes, which is important to the delineation of the subsurface fault-fracture systems and the corresponding accumulation models of natural gas in the Sichuan Basin.

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

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.04.038

## 0 引言

致密砂岩储层中断缝系统主要由主干断层及其所控制的破碎带组成,其不仅提供了渗流通道,同时也可能提供了储集空间,因此其空间分布特征往往控制着致密砂岩油气的分布和富集<sup>[1-2]</sup>。

断层破碎带由断层核及断层核周围的破碎带组成<sup>[3-5]</sup>。其中,断层核由滑动面、断层泥、碎裂岩、角砾岩等高应变产物组成,一般为较窄的局部滑动带;破碎带一般为诱导裂缝发育的岩石,变形强度介于断层核和围岩之间。通常,断层破碎带的宽度由破碎结构中裂缝频率的分布定义,裂缝发育的程度一般是随断层核距离的增大而减小(一般呈指数减小),直到和围岩的变形特征相一致<sup>[3-6]</sup>。那么,断层破碎带的外边缘(破碎带和围岩的边界)可以视为裂缝发育程度下降到一定的值(围岩背景值)的位置。这种方法为定量地识别断层破碎带的区域提供了有用的思路,在很多涉及断层破碎带的宽度研究当中得到了成功的应用<sup>[7-11]</sup>。

但是这种基于裂缝密度来量化断层破碎带宽度研究方法主要集中于地表露头的分析,存在几个明显的问题:①精确识别破碎带与围岩之间的边界较困难,因为所有的物理性质都是逐渐而不是突然变化的,所以在不同情况下定义破碎带边界的标准不同,这种标准受主观性影响较大<sup>[12]</sup>。②在统计裂缝密度的时候,大尺度的裂缝直接在野外露头观察、而微裂缝通过在显微镜下观察薄片计数。不同研究人员、不同地区对有效裂缝的定义不同,且在统计的过程中难以始终保

持一致的标准<sup>[12]</sup>。③断裂带是一个十分复杂的三维破碎带结构,其宽度在纵向上和横向上都会发生变化,但是这种基于裂缝密度的量化方式,往往是选择一条垂直于断层走向的基线,然后测量其裂缝密度的统计情况。这种量化结果显然无法表达地下断裂带的三维结构形态,渗流特征更难以确定<sup>[13]</sup>。

本文以四川盆地东北部通南巴马路背地区为例,提取相关的地震几何属性对须家河组二段致密砂岩断层破碎带的平面分布进行识别和分析。地震数据本身限于分辨率无法直接识别裂缝,但地震响应反应了断层破碎带的总体特征。这个新的分析流程使断层破碎带几何形态的识别和刻画成为可能,为建立四川盆地致密砂岩地下断缝系统和相应的油气富集成藏模式提供了基础。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域

通南巴地区在地理上处于中国四川盆地的北部,其在行政上位于四川省巴中市北部片区。通南巴地区发育一几乎贯穿全区的呈北东东向走向的大型背斜,称为通南巴背斜<sup>[14-16]</sup>(图1)。研究区马路背地区位于通南巴地区东北部,工区面积约为225 km<sup>2</sup>(图1)。通南巴背斜北侧紧邻米仓山逆冲推覆带,南接四川盆地中部平缓丘陵,西侧远端为龙门山造山带,东北侧紧邻大巴山弧形前陆冲断带。该构造主要受来自米仓山和大巴山多期次(燕山期和喜山期)不同方向(NW和NE

向)的构造应力作用影响,其褶皱、断层、裂缝十分发育<sup>[13-16]</sup>。通南巴的断裂系统在剖面上受嘉陵江组膏盐岩为界,有较明显的上下分层特征<sup>[15-17]</sup>。在平面分布上,研究区主要分布NW-SE向平行展列的逆断层。

通南巴地区在中三叠统雷口坡组末期逐渐发生海退并开始了陆相沉积史,其中上三叠统须家河组二段为本论文的研究层位,以致密砂岩为主,深度在3~4 km之间。须一段在研究区基本不发育,须二段和须四段主要为致密砂岩,须三段和须五段主要为页岩、泥岩和薄煤层<sup>[17]</sup>。

1.2 地震属性模型

在地震解释中,曲率属性作为一种用来表征曲面在空间里的弯曲程度的二阶导数属性,可以更有效的识别地震数据上的褶皱、断层以及裂缝等构造,并对

地层产状的变化十分敏感<sup>[18]</sup>。当岩层受到应力作用发生弯曲,其弯曲程度越高,则曲率值越高。通常情况下,背斜的曲率值为正、向斜的曲率值为负、单斜和平层均为零曲率(图2)。而这些曲率高的地区,由于受到较强的应力作用,也极易形成断层和裂缝。因此曲率属性可以用来间接揭示这些低于地震分辨率的裂缝。

曲率K值一般用沿x方向的导数形式求解(推导见<sup>[18]</sup>):

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

地震的方差属性是相干属性的一种,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D,

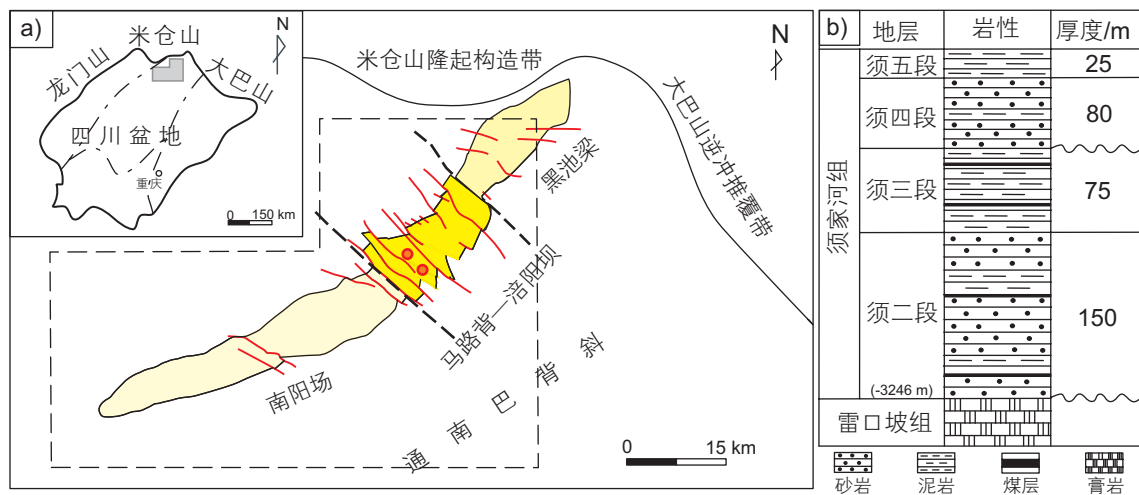


图1 研究区域(a)地质构造图和(b)基本地层  
Fig. 1 (a) Structure map of the study area and (b)stratigraphic column

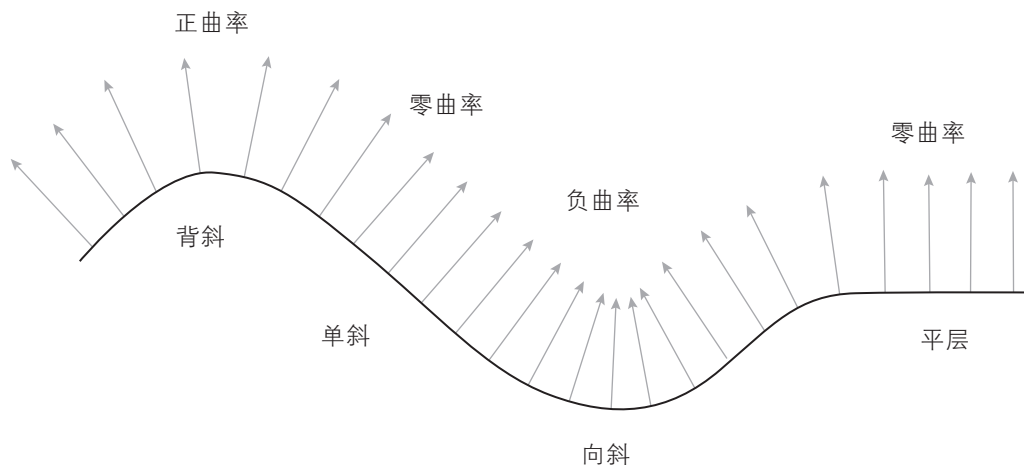


图2 褶皱的曲率特征  
Fig. 2 Curvature characteristics of folds



以此检测地下断层的发育情况<sup>[13]</sup>。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,反之亦然。方差值 $D$ 的计算方程如下:

$$D^2 = \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (2)$$

本文使用方差属性确定断裂错动的位置和大概破碎区间,通过曲率属性识别因断裂形成的强制地层褶皱带。这些褶皱多数是紧密围绕断层,和方差属性识别的破碎区间一般有一定的重合度,也是断裂破碎带重要的识别特征之一。多个典型属性的相互融合验证,可以更加准确地刻画断层破碎带。

## 2 结果与分析

### 2.1 断层破碎带的分布

在对马路背地区须家河组二段叠后地震资料进行精准的层位追踪和解释后,我们分别计算了该工区地震数据的极大、极小曲率属性和方差属性,并通过软件沿追踪的层位(见图3黄线)提取相关的属性叠加于须家河组二段顶面高程图上,进而分析断裂带在须二顶的发育分布特征。

图3a展示了马路背地区在须家河组二段北东—南西向的背斜构造,背斜长轴约为18 km,短轴约为12.2 km。图3b显示,在过NE向褶皱轴剖面上发育一系列的(北北西向)次级褶皱和断层。须二地层可见3个次级背斜构造高点和4条具有一定宽度的断层破碎带(图3c)。从该构造图的整体背斜轴向和叠加在背斜主体上的系列次级褶皱和断层发育特征可以看出,研究区至少经历两次不同方向的构造活动。具体解释为,研究区在早期(燕山期)主要受到北西—南东向的挤压形成北东向展布的通南巴背斜主体,晚期(燕山晚期)受到北东向的挤压形成系列叠加在大背斜主体上的系列北北西向次生褶皱和断层。

为了更好地分析目标层褶皱和断层的分布情况,我们提取须家河组二段极大曲率属性(图4)和极小曲率属性(图5),并将两种曲率属性分别叠加于该地层高程图上。图4红黄色部分表示背斜高部区域,蓝绿色部分表示低构造区域。高构造区域的红黄色总体沿通南巴背斜轴迹NE方向,两侧由红黄颜色逐步过渡到蓝绿颜色,是通南巴背斜构造主体的两翼。

在图4中,红色部分曲率值为极大值(正曲率,代表背斜或隆起构造),相应图5中蓝色部分曲率值为极小值(负值,代表向斜或凹陷构造)。由极大极小曲率

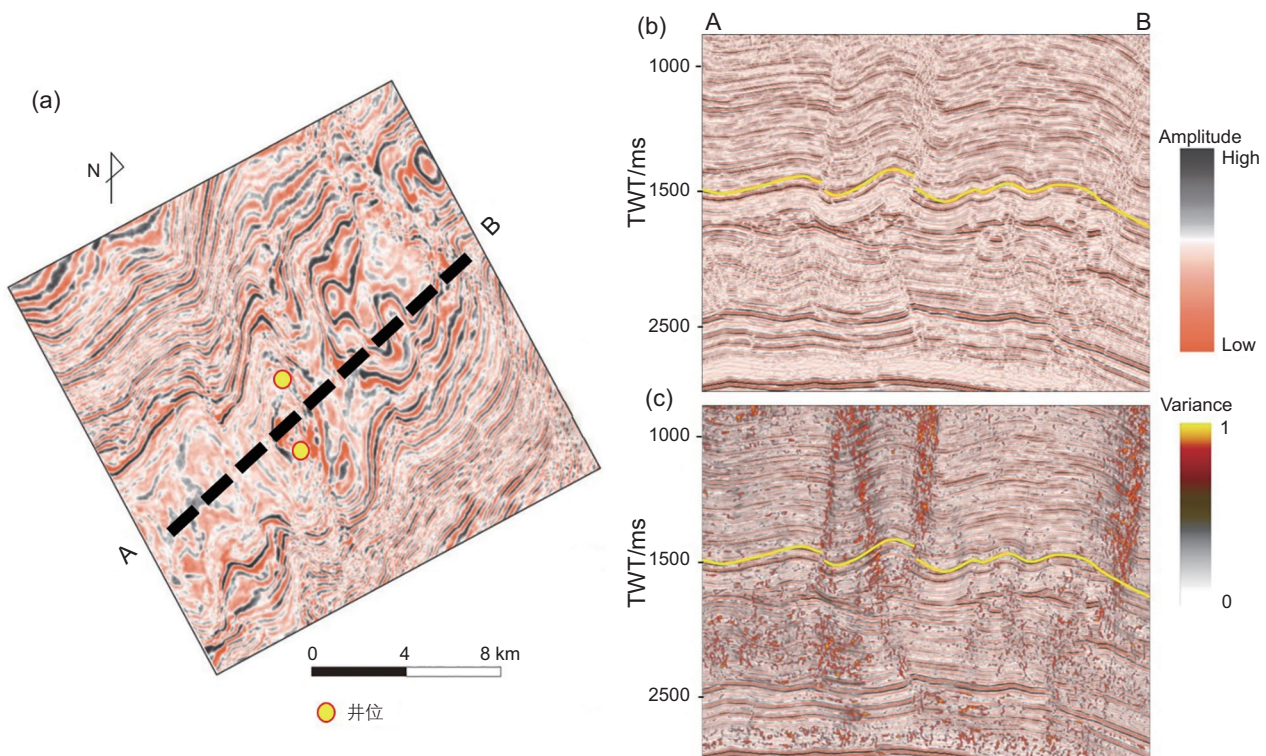


图3 穿过褶皱区(a)地震水平切图、(b)剖面图及(c)振幅剖面叠加方差属性图

Fig. 3 The seismic time slice through the main fold (a), profile along AA'(b), and amplitude profile co-rendered with seismic variance (c)

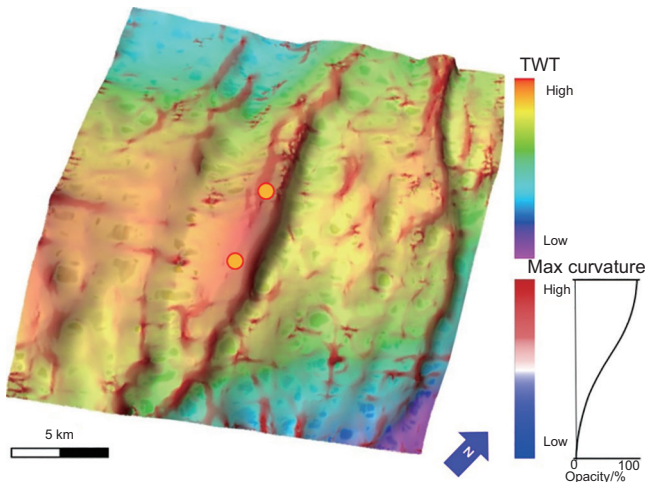


图4 须家河组二段顶面高程叠加极大曲率属性图

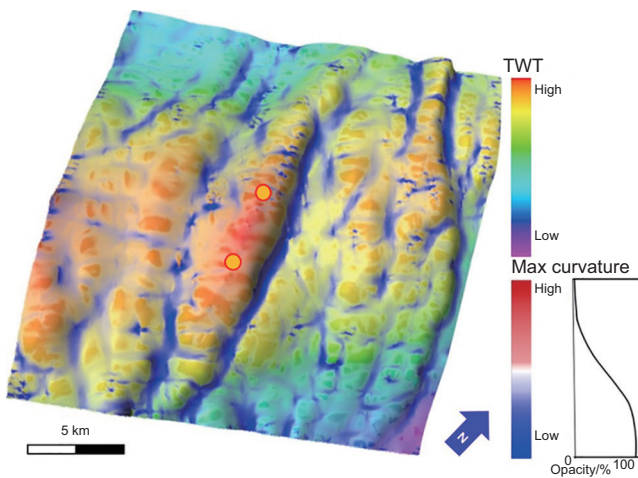
Fig. 4 Curvature attribute map of maximum curvature attribute co-rendered with elevation of the top of  $T_3x^2$ 

图5 须家河组二段顶面高程叠加极小曲率属性图

Fig. 5 Curvature attribute map of minimal curvature attribute co-rendered with elevation of the top of  $T_3x^2$ 

属性叠加图可以明显识别出伴随断层产生的呈明显条带状的褶皱带,包括逆断层上盘的背斜,即红色区域(正曲率构造),和下盘的向斜,即蓝色区域(负曲率构造)。中部马101、马103井所处的位置是通南巴背斜高点和次级褶皱曲率极大值重叠的区域。这个区域既有早期(燕山期)通南巴大背斜顶部大量的裂缝(裂缝I),也有晚期(燕山晚期)次生褶皱顶部的裂缝(裂缝II)。由于两期受力方向相反,我们认为裂缝I和裂缝II可以形成联通性良好的正交裂缝网络。

图6显示了沿须家河组二段的方差属性,这个属性对断层破碎带的识别与分析有重要意义且应用最广。方差属性是通过一定的算法检测并放大相邻地震道的波形差异来提取断层等特殊构造的发育信息,经过加

权归一化处理后的方差值的范围为在0到1之间,方差值越大,地层越不连续,代表断层破碎带地质构造越发育。图中红色及黑色区域方差值较高,指示断层破碎带发育区。通过方差属性叠合须家河组二段高程图并结合剖面分析(图3c),工区内共发育3条NNW走向贯穿通南巴大背斜的长断层破碎带,除此之外在通南巴北翼还发育3条延伸不长但宽度大的断层破碎带。在背斜主体的南翼东部也表现出极强的不连续性,结合曲率属性,该区域地层未发生明显的错动,属于通南巴大背斜褶皱形成的裂缝发育区。

至此,我们将目的层识别出来的断层破碎带分为两类,一类是在走向上几乎贯穿全区的一级断层(F1、F3、F6),一类是在工区范围内走向上延伸较短的二级断层(F2、F4、F5)。需要注意的是,这里对一级断层和二级断层的分类只是依据属性图上断层在目的层的走向延伸长度,但是断层破碎带发育的规模(比如宽度)还和断层破碎强度、地层岩性、在纵向上发育的深度、断层两盘地层组合等各种情况息息相关,所以这里的分类不代表一级断层破碎带的发育规模就一定大于二级断层破碎带。

## 2.2 断层破碎带识别结果综合分析

通过马路背地区须二段地层属性分析(图4~6),可以明显看出目的层为北东—南西向通南巴大背斜构造背景下,发育一系列的北北西向的次生褶皱和断层破碎带为主。基于曲率和方差属性图(图4~6),我们得到了这些断层破碎带在三维空间的展布特征(图7;该图未解释每条断层具体的切穿层位)和相关参数(表

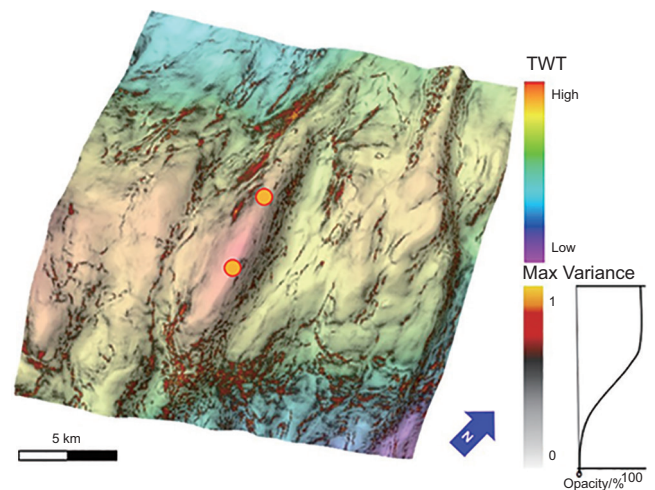


图6 须家河组二段顶面高程叠加方差属性图

Fig. 6 Attribute map of variance in the top of  $T_3x^2$  co-rendered with elevation of the top of  $T_3x^2$



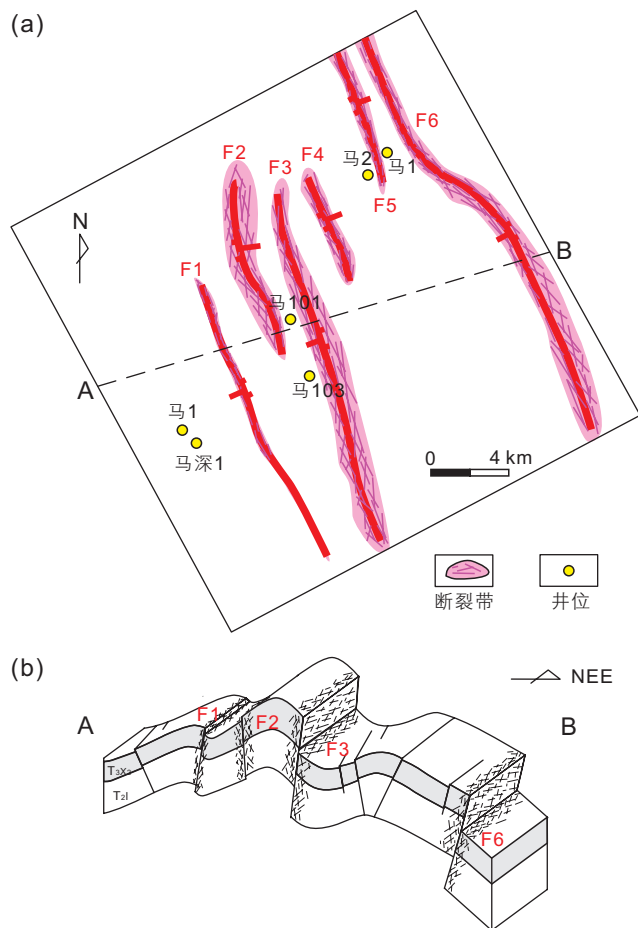


图7 研究区须家河组二段顶层断层(a)平面分布示意图;(b) AB剖面构造示意图

Fig. 7 (a) The fault distribution plan schematic diagram in the top of  $T_3x^2$  in study area; (b) The structure schematic diagram of AB section

表1 马路背地区须家河组顶层主要断层基本特征

Table 1 Basic characteristics of major faults in the top of  $T_3x^2$  in Malubei area

断层名称	性质	走向	倾向	倾角	断距	延伸长度 (工区范围)	切断层位	破碎带宽度/m	
I类断层	F1	逆断层	北北西	北西西	80°左右	50 m左右	10 km左右	上至地表 下至 $T_j^{4-5}$	270~780
	F3	逆断层	北北西	南西西	80°左右	350 m左右	12 km左右	上至地表 下至 $T_j^{4-5}$	700~1200
	F6	逆断层	北西	南西	73°左右	400 m左右	15 km左右	上至地表 下至 $T_j^{4-5}$	380~440
II类断层	F2	逆断层	北北西	南西	78°左右	45 m左右	6 km左右	上至地表 下至 $T_j^{4-5}$	670~1250
	F4	逆断层	北西	南西西	66°左右	80 m左右	3 km左右	上至 $J_3z$ 下至 $T_j^{4-5}$	420~550
	F5	逆断层	北北西	南西西	76°左右	100 m左右	4.5 km左右	上至地表 下至 $T_j^{4-5}$	370~560

1)。断层走向基本都为北北东向,但倾向各异:F1为北西西向,F2为南西西向,F3为南西,F4为南西,F5为南西西,F6为南西西向。图7显示了F1~F6断层破碎带及其相互之间在空间上展布的关系。

通过对振幅剖面的层位标定及上述平面分布特征,对工区内所定位的三个一级断层进行初步分析认为:①断层破碎带向上通至地表,向下于至少到嘉陵江组四五段,可至于志留系地层;②断层性质全部为高角度逆断层;③F3和F6断层两盘的错断距离明显大于F1,且前两者破碎带宽度在剖面上明显宽于后者。

根据须二段构造等高图和过井剖面解释(图3),Ma101和Ma103均处于断块的高部位(背斜高点),且周围都有大断层破碎带(F2、F3)。Ma101和Ma103东侧F2断层破碎带非常发育,且为通源断裂可断穿至志留系地层,对其沟通下部海相气源贡献极大,断缝成藏优势明显;而其他区域虽也有处于断块两背斜之间的区域,但处于构造低部位,并且离大断层较远,断缝成藏优势次之。

### 3 结论与建议

地下断层破碎带平面分布的识别对分析致密砂岩断缝系统的分布情况和结构特征有着重要的意义<sup>[9]</sup>。本文通过三维地震多属性分析识别了马路背地区须家河组二段致密砂岩的构造情况和断层破碎带分布,得出如下认识:

(1)通南巴背斜在不同时期受到来自不同方向不同强度应力的综合作用,形成现今的北东向的背斜主

体, 并叠加有一系列北西向的次生褶皱和断层破碎带。其构造特征整体表现为: 东西分段、上下分层。即断裂—褶皱组合形态多样复杂。

(2) 极大、极小曲率、方差等属性的融合使用, 可以促进对马路背地区须二地层的断层破碎带的分析。

(3) 综合多属性分析认为, 工区范围内目标层主要发育三条在走向上贯穿通南巴背斜的一级断层破碎带(F1、F3、F6), 和三条走向上延伸较短的二级断层破碎带(F2、F4、F5), 断层走向均为北北西向, 一级断

层破碎带在工区范围内的延伸长度均在 10 km 以上, 二级断层破碎带的延伸长度在 3~6 km 不等, 各自破碎带宽度不同, 是该地区的断缝系统重要组成部分。

(4) Ma101 和 Ma201 均处于多重构造的高部位(背斜高点), 且周围都有大型的断层破碎带(F2、F3)。我们认为 F2 断层破碎带非常发育, 又断穿至志留系顶, 在特定时期里起着海相天然气的通源作用; 而其他区域虽也有处于断块两背斜之间的区域, 但处于构造低部位, 并且离大断层较远, 断缝成藏优势较不明显。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] SAUL C J, EVANS J P, FORSTER C B. Fault zone architecture and permeability structure[J]. *Geology*, 1996, 24(11): 1025–1028.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] LIN A, YAMASHITA K. Spatial variations in damage zone width along strike-slip faults: An example from active faults in southwest Japan[J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 57(2): 1–15.
- [11] FAULKNER D R, MITCHELL T M, HEALY D, et al. Slip on weak fault by the rotation of regional stress in the fracture damage zone[J]. *Nature*, 2007, 444(7121): 922–925.
- [12] SAGY A, RECHES Z, ROMAN I. Dynamic fracturing: Field and experimental observations [J]: *Journal of Structural Geology*, 2011, 23: 1223–1239, doi: 10.1016/S0191–8141(00)00190–5.
- [13] 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.
- [14] 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.]
- [15] 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.]
- [16] 茹锦文, 莫源富, 黄瑞照. 利用卫星遥感资料研究川东北通南巴构造—利用法国 SPOT 卫星研究大型含油构造 [J]. *矿产与地质*, 1990(s1): 1–27. [RU J W, MO Y F, HUANG R Z. The application of spot satellite data to study Tongnanba petroliferous anticline structure in northeastern Sichuan, China[J]. *Mineral Resources and Geology*, 1990(s1): 1–27.]
- [17] 常远, 许长海, REINERS P W, 等. 米仓山—汉南隆起白垩纪以来的剥露作用: 磷灰石(U-Th)/He 年龄记录 [J]. *地球物理学报*, 2010, 53(4): 912–919. [CHANG Y, XU C H, REINERS P W, et al. The exhumation evolution of the Micang Shan-Hannan uplift since cretaceous: Evidence from apatite (U-Th)/He dating[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(4): 912–919.]

- [18] STAPLES E. Subsurface and experimental analyses of fractures and curvature [D]. Oklahoma: University of Oklahoma, 2011.
- [19] 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 X, HOU J G, 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.]

(责任编辑 姜福杰 编辑 付娟娟)