

塔里木盆地顺南地区深层碳酸盐岩断裂和裂缝地震识别与评价

刘军¹,任丽丹¹,李宗杰¹,王鹏¹,杨子川¹,马灵伟²

(1. 中国石化西北油田分公司勘探开发研究院,新疆乌鲁木齐 830011; 2. 中国石化石油物探技术研究院,江苏南京 211103)

摘要:近年,在塔里木盆地顺南地区多条北东向走滑断裂带遇好的油气成果,证实了走滑断裂具有控储、控藏的作用。受埋深大、信噪比低、断裂纵向断距小等因素影响,小断裂及裂缝发育区地震响应不清、描述困难。在顺南三维实际资料的基础上,分灰岩顶面及内幕两类模型开展数值正演模拟,明确不同尺度断裂地震响应特征并建立地震识别模式;依据走滑断裂地质特征及地震识别模式,分级优选了趋势面、精细相干、蚂蚁体和最大似然体等敏感技术;依据断裂预测成果从断裂性质、断裂级别、断裂分段性和缝洞发育特征等方面开展走滑断裂带描述与评价,总结认识指导区带及目标优选。

关键词:数值模拟;走滑断裂;碳酸盐岩;顺南地区;塔里木盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Seismic identification and evaluation of deep carbonate faults and fractures in Shunnan area, Tarim Basin

Liu Jun¹, Ren Lidan¹, Li Zongjie¹, Wang Peng¹, Yang Zichuan¹, Ma Lingwei²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 2. Geophysical Research Institute, SINOPEC, Nanjing, Jiangsu 211103, China)

Abstract: There are many oil and gas discoveries along NE-trending strike-slip faults in Shunnan area, Tarim Basin, indicating that the strike-slip faults can be a controlling factor for hydrocarbon migration and accumulation. Considering deep burial depth, low signal-to-noise ratio and small fault displacement along the faults strike, seismic responses of small fault and fracture zones are not clear and difficult to be interpreted. Based on the actual three-dimensional seismic data of the Shunnan area, we carried out the numerical simulation for two models, model of limestone top surface and model of limestone internal surfaces. We also clarified seismic response characteristics for faults of different scales and established seismic identification model. According to the geological features and seismic recognition pattern of strike-slip faults, we selected sensitive seismic attributes such as trend surface, fine coherent, ant body and likelihood. Finally, based on the results of fracture prediction, the paper gave a description and evaluation on the strike-slip fault zone, such as fracture properties, levels, segmentation, and cavity features, and gave advice to the optimization of exploration plays and prospects.

Key words: numerical simulation, strike-slip fault, carbonate rock, Shunnan area, Tarim Basin

塔里木盆地顺南地区及邻区钻井揭示了中-下奥陶统主要发育3套储层:蓬莱坝组、鹰山组下段和一间房组-鹰山组上段。储层类型有裂缝型、裂缝-孔洞型、裂缝-洞穴型,储层分布多与北东向走滑断裂及北东东向次级断裂有关^[1-2]。

该区发育的北东向走滑断裂带在空间上呈近平行排列。在剖面上,断裂带多表现为花状构造样式,主断面陡直,直插基底;在平面上,断裂带普遍表现为线性延伸或带状展布,延伸距离约60~160 km,具有拉分段负花样式、平移段线性样式以及挤压段正花样式等交

收稿日期:2017-01-03;修订日期:2017-04-21。

第一作者简介:刘军(1982—),男,工程师,地球物理勘探。E-mail:408842381@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05005005-005)。

替出现的断裂分段特征^[3]。近几年,沿北东向走滑断裂带钻探的 G1 井、W1 井和 W4 井等都获得了较好的油气成果,证实了北东向走滑断裂带具有控储、控藏的作用。

顺南地区地表被高大沙丘覆盖,地震采集的激发和接收条件差,地震资料信噪比较低。地震波向深层传播时高频信息衰减快,目的层中—下奥陶统碳酸盐岩埋深大(>6 500 m)、地震资料主频低(20 Hz 左右)、分辨率低。该区走滑断裂带以水平位移为主,纵向断距小。在低信噪比、低分辨率的资料背景下,目的层小断裂及裂缝的地震响应特征不清、预测难度大,很难有效开展断裂带描述与评价^[4-6]。针对该区地震资料和地质目标的特点,重点开展不同尺度断裂的波场特征分析、敏感参数优选及走滑断裂精细描述是该区油气勘探工作的关键。

1 不同尺度断裂模型建立与正演模拟

1.1 碳酸盐岩表层断裂地震响应特征量化

依据钻井、地震和地质资料建立碳酸盐岩表层(T_7^4)不同尺度断距的断裂模型,断距分为纵向断距和横向断距。其中,纵向断距的大小依次为 10, 20, 30, 40, 50 m;当纵向断距大小一定时,横向断距的变

化范围为 10, 20, ..., 150, 160 m,断距大小按 10 m 间隔递增。研究不同尺度纵向和横向断距的断裂地震响应特征,为断裂分级识别提供依据。

依据顺南区块实际地层结构及其岩石物理参数,设计正演模型的地层厚度及速度:却尔却克组厚度为 2 400 m,速度为 4 950 m/s;恰尔巴克组厚度为 20 m,速度为 5 300 m/s;一间房组厚度为 150 m,速度为 6 000 m/s;鹰山组厚度为 1 000 m,速度为 6 100 m/s。正演模拟的观测系统参考野外实际地震采集的参数进行设定:炮间距为 50 m,道间距为 50 m,CDP 间隔为 25 m,模型深度为 6 500 m,子波主频为 22 Hz 雷克子波。采用基于交错网格有限差分格式的波动方程数值模拟技术^[7-8]开展不同尺度断裂模型的正演模拟。

将正演模拟得到断裂模型的炮集记录进行叠加、偏移成像处理,转换成具有不同纵、横向断距的断裂的偏移剖面。依据该区实际地震资料目的层信噪比特征,在正演模拟的偏移结果中加入信噪比为 4 的随机噪音(图 1)。可以看出,随着纵、横向断距的变大 T_7^4 地震反射波(简称 T_7^4)同相轴特征发生较大的改变,当纵、横向断距较小时 T_7^4 同相轴表现为“小褶曲”特征,随着纵、横向断距增加 T_7^4 同相轴由“小褶曲”向“明显褶曲”及“错断”变化。

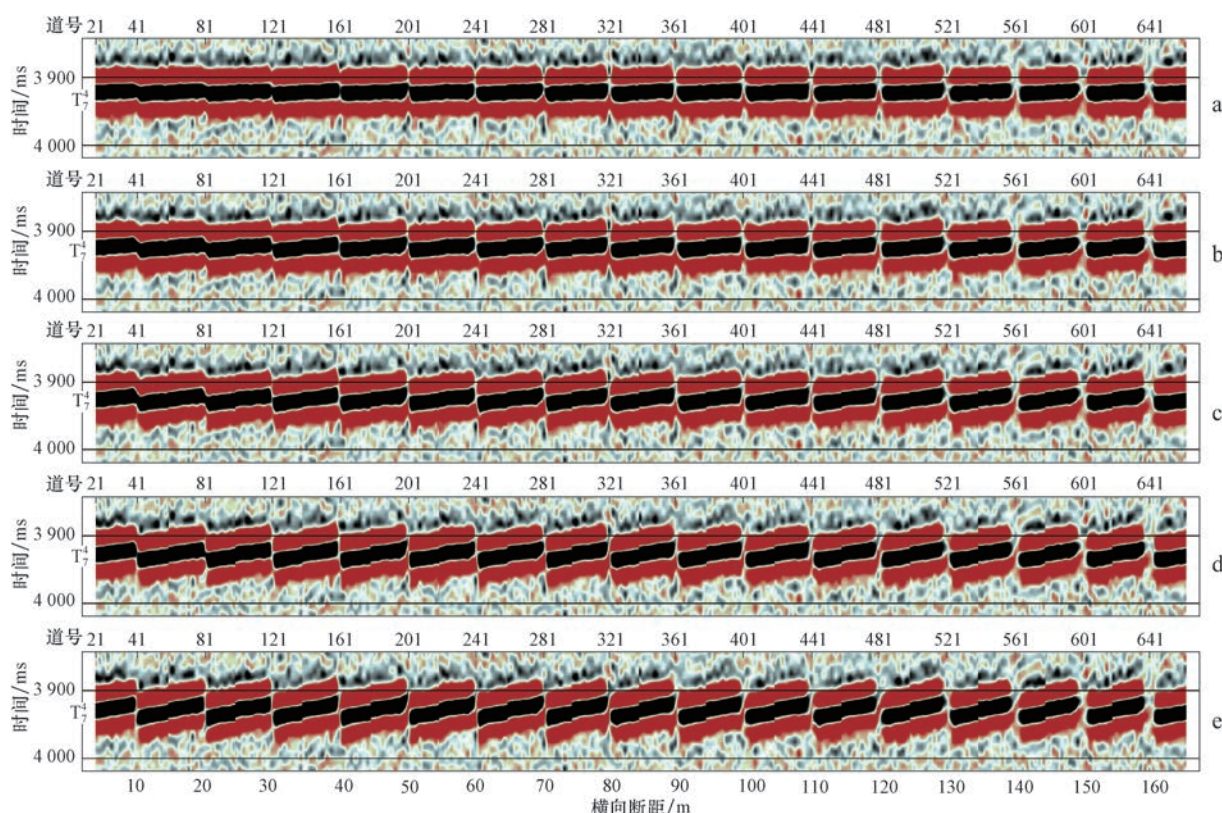


图1 不同纵、横向断距模型正演模拟结果偏移剖面

Fig. 1 Migration profiles of forward modeling results for different horizontal and vertical fault throws

a. 纵向断距 10 m; b. 纵向断距 20 m; c. 纵向断距 30 m; d. 纵向断距 40 m; e. 纵向断距 50 m

基于正演模拟结果,进行顺南地区奥陶系碳酸盐岩表层断裂地震识别尺度分级。①小尺度断裂地震响应特征为小褶曲。断距范围:垂向断距 ≤ 20 m,断裂宽度 ≤ 30 m,且纵、横向断距的乘积 < 600 。②中尺度断裂地震响应特征为大褶曲。随着纵、横向断距增加,褶曲变大、变明显。断距范围:纵向断距 $= 30 \sim 40$ m,或横向断距 $= 40 \sim 50$ m,或 $600 \leq$ 纵、横向断距的乘积 $< 1\,200$ 。③大尺度断裂地震响应特征为同相轴错断。断距范围:纵向断距 ≥ 50 m,或横向断距 ≥ 60 m,或纵、横向断距的乘积 $\geq 1\,200$ 。

1.2 奥陶系内幕断裂带地震响应特征量化

依据钻井、地震和地质资料设计碳酸盐岩内幕不同宽度及不同裂缝发育密度的断裂带模型(图2)。模型中不同断裂带的宽度依次为:20,40,60,80,100,120,150,180,200,250,300 m;断裂带内部裂缝发育密度(P)的范围:4%,6%,8%,10%,12%,15%,18%,20%,25%,30%。研究不同宽度、不同裂缝发育密度的断裂带地震响应特征,为断裂分级识别提供依据。

顺南地区 W1 井和 W7 井等已钻井取心成像资料

显示,该区以发育高角度裂缝为主,周围伴随微裂缝。因此,选用 80° 和 110° 作为断裂带内部裂缝的倾角。充填裂缝的尺度:宽度2 m、长度20~60 m;裂缝的充填速度为4 800 m/s,断裂带内的背景速度为5 800 m/s,围岩的速度为6 100 m/s。正演模拟的观测系统参考野外实际地震采集的参数进行设定:炮间距为50 m,道间距为50 m,CDP间隔为25 m,模型深度为6 500 m,子波主频为22 Hz 雷克子波。采用基于交错网格有限差分格式的波动方程数值模拟技术开展不同尺度断裂模型的正演模拟。

将正演模拟得到的断裂模型的炮集记录进行叠加、偏移成像处理,转换成具有不同宽度和裂缝发育密度的断裂偏移剖面。在偏移结果中加入信噪比为4的随机噪音(图3)。可以看出,当断裂带宽度较小且裂缝发育密度很小时,断裂带地震响应特征不明显,被噪音掩盖,很难与围岩的地震响应区分开。随着断裂带宽度增大或裂缝发育密度的增加,断裂带内部的“杂乱”地震响应的振幅逐渐增强。依据储层地震识别基本理论^[9-10],当断裂带内部能量大于围岩背景值时,断裂带可被识别。在信噪比为4的随机噪音下,围岩的背景振幅最大值为0.06,断裂内幕振幅值大于0.06

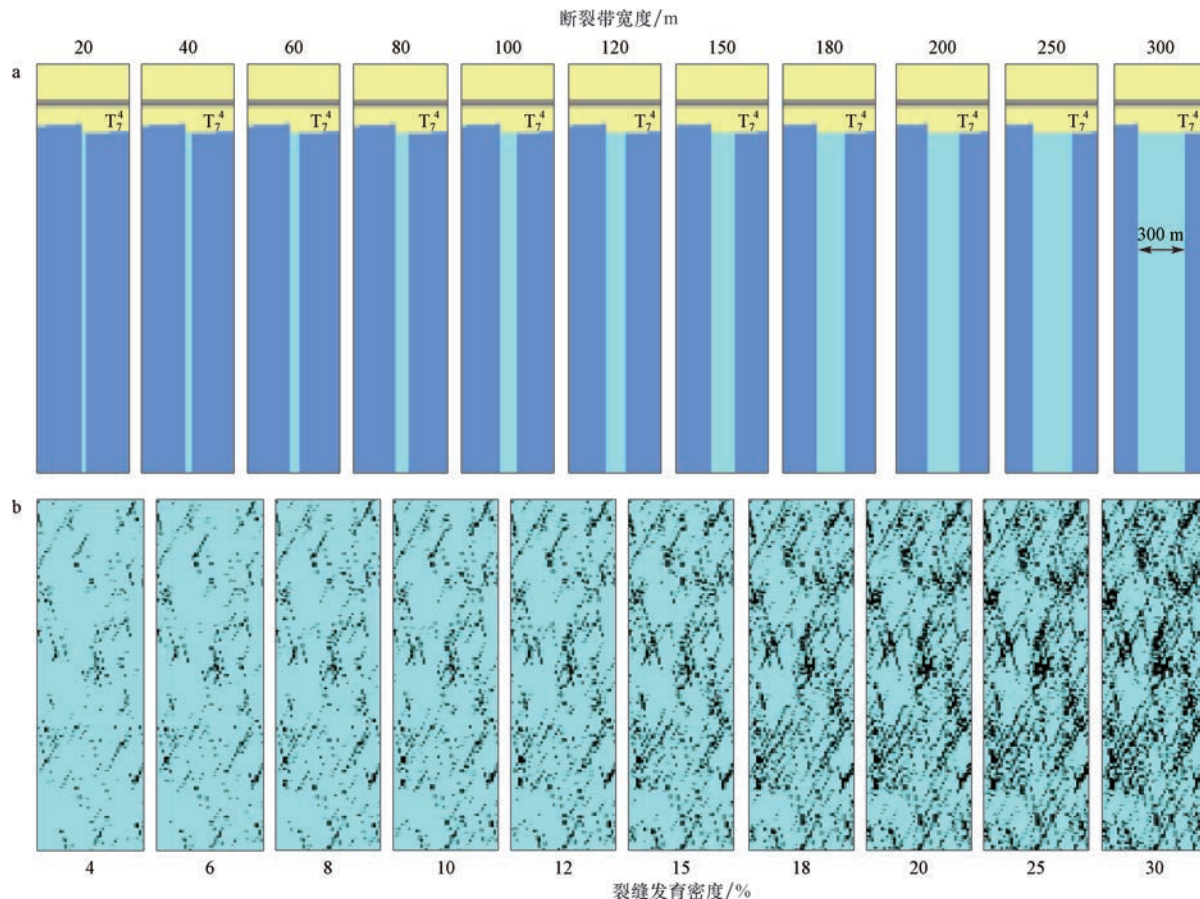


图2 不同宽度(a)及不同裂缝发育密度(b)的断裂带模型

Fig. 2 Fracture zone models with different width and density

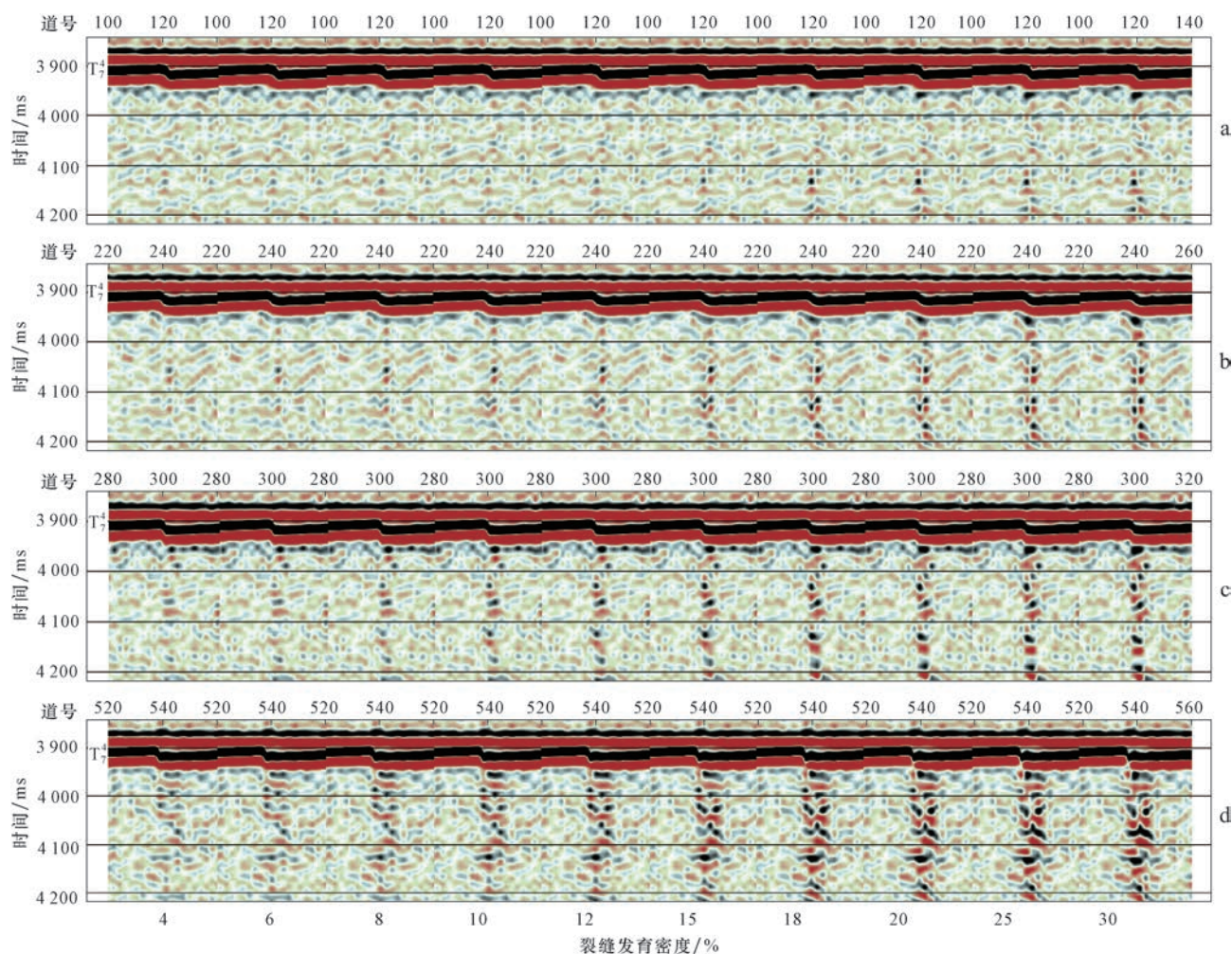


图3 不同宽度及不同裂缝发育密度断裂模型正演模拟结果偏移剖面

Fig. 3 Migration profiles of forward modeling results with different width and density

a. 断裂带宽度 40 m; b. 断裂带宽度 80 m; c. 断裂带宽度 100 m; d. 断裂带宽度 200 m

基于正演模拟结果,进行顺南地区奥陶系碳酸盐岩内幕断裂带地震识别尺度分级。①小尺度:断裂带宽度 ≤ 40 m。当裂缝发育密度超过30%时,断裂带表现为“杂乱”反射特征;裂缝发育密度低于30%时,断裂带不易被识别。②中尺度:断裂带宽度 $=50 \sim 100$ m。当裂缝发育密度在10%~15%时,表现为“杂乱”反射特征,边界不清晰;当裂缝发育密度超过18%时,断裂带边界变清晰。③大尺度:断裂带宽度 ≥ 100 m。当裂缝发育密度超过10%时,表现为“杂乱”强反射特征,断裂带边界清晰。

1.3 不同尺度断裂地震识别模式建立

以奥陶系碳酸盐岩表层及内幕不同尺度断裂的正演模拟结果为基础,结合实际钻井资料、地震采集参数及资料品质、地质认识等进行断裂尺度分级,初步建立了顺南地区大、中、小尺度断裂的划分标准及叠后地震识别模式(表1)。

2 不同尺度断裂预测技术

由于断裂检测技术原理的差异,导致不同技术方法断裂检测效果具有一定的适用性及选择性。所以针对不同级别的断裂检测,通过反复试验及参数调试,结合正演模拟的地震识别模式结果,明确了不同尺度断裂检测的最优方法。

2.1 大尺度断裂预测

1) 趋势面分析技术

趋势面分析是跟据空间现象的抽样数据,拟和数学曲面,用该曲面来反映空间现象分布特征的变化趋势。滑动趋势面分析是根据地震资料解释得到的一间房组顶面原始深度层位的分布特征,确定滑动范围的区域和平滑参数,通过滑动计算得到反映构造趋势变化的平滑深度层位^[11]。将构造界面的平

表 1 顺南地区不同尺度断裂地震响应识别模式
Table 1 Seismic identification patterns for different scales of faults in Shunnan area

尺度分级	地质意义	地震响应特征		划分标准
大尺度	断裂带	T ₁ ⁴ 界面	同相轴错断	垂向断距≥50 m,或宽度≥60 m,或纵、横向断距乘积≥1 200
		内幕	“杂乱”强反射,“串珠”响应较多	断裂带宽度>100 m,当裂缝发育密度≥10%时,断裂带边界清晰;裂缝发育密度<10%时,断裂带边界不清晰
中尺度	断裂	T ₁ ⁴ 界面	明显褶曲	纵向断距=30~40 m,或横向断距=40~50 m,或600≤纵、横向断距乘积<1 200
		内幕	“杂乱”反射,“串珠”响应少	断裂带宽度=50~100 m,当裂缝发育密度=10%~15%时,断裂带边界不清晰;当裂缝发育密度超过18%时,断裂带边界变清晰
小尺度	小断裂	T ₁ ⁴ 界面	小褶曲	垂向断距≤20m,断裂宽度≤30m,且纵、横向断距乘积<600
		内幕	“杂乱”弱反射	断裂带宽度≤40m,当裂缝发育密度≥30%时,若裂缝发育密度<30%,断裂带不易被识别

滑层位减原始层位的差值数据进行成图,得到反映反射界面残丘等低幅度地质现象的平面趋势分布图。正值代表地层凸起或背斜部位,负值代表地层下掉或向斜部位。趋势面技术检测结果能够较真实反映大尺度断裂带的平面形态展布、断裂带形变幅度及走滑断裂带的分段性等,但对中小尺度断裂检测效果较差。

本区北东向断裂带多具有分段性,一间房组顶面的趋势面可以表征该地层的断裂变形强度、水平幅度及断裂分段性特征。趋势面等值线正值>5 m,表示地层上凸;等值线负值<-5 m,表示地层下掉;等值线数据=-5~5 m,表示地形相对平缓。等值线越密,说明地层上凸或者下掉的幅度越大,代表断裂变形强度大;断裂的水平幅度可用等值线外圈的短轴表示。同一条断裂正负地形交替出现,反映了断裂的分段性特征。

2) 相干技术

相干技术是计算相邻地震道之间的相似性,分析地层、岩性在同相轴横向上的变化,识别断层、褶皱及其它构造现象。通常来说,当要高度突出地层特征或低角度断层时,应使用小的时间孔径;当要突出持续性地质特征,如高角度断层时,应使用较长的时间孔径。相邻道之间相似性越好,相干系数越大;反之,相干系数越小。引起低值异常的原因有如下几种:①断层及其附近;②地层或岩性变化,特殊的沉积体系;③地层倾角比较大;④缺少反射;⑤数据质量差等。不相干数据异常体可能代表小断层、小岩性异常体或灰岩缝洞等地质现象,所以应用地震相干数据体进行断层的自动和半自动解释时,要进行综合对比才能分辨清楚。

相干计算有 3 个控制参数:①时间孔径,为相干运算的时间长度,对于厚层地质体半个波长即可;②空间孔径,为运算时单次参与计算的地震道数量,值越小运算越快;③倾角限制方式,沿不同倾角方位限定计

算方向^[12-13]。

正演模拟证实碳酸盐岩表层大尺度断裂表现为 T₁⁴ 地震反射波同相轴的明显错断,相干技术能清晰的检测出走滑断裂带内断距明显的单条断裂的空间展布特征,指导工区内主干断裂的平面与剖面对比解释。碳酸盐岩表层的中小尺度断裂表现为 T₁⁴ 同相轴的扭曲或振幅微小变化,利用相干技术识别效果不佳。

碳酸盐岩内幕的断裂带内裂缝发育时,剖面上大尺度和中尺度断裂带内部都表现为“杂乱”反射特征,与围岩的较为连续的地震响应特征明显不同,可利用相干技术进行碳酸盐岩内幕断裂带的检测,弱相干能很好地反映“杂乱”反射结构,较清晰的刻画出断裂带的边界和内部结构变化。

2.2 中尺度断裂预测

曲率是曲面的三维性质,用于描述曲面上任意一点的弯曲程度,曲率属性可以突出断层、裂缝、背斜、向斜等几何特性。Roberts (2011)已证明大多数正、负曲率属性是优秀的线性构造鉴别器,在断裂分析中也非常有效^[14]。当地层为水平层或斜平层时定义曲率为零,当地层为背斜时定义曲率为正,向斜时为负,层面弯曲变形越厉害,曲率的绝对值就越大。

碳酸盐岩表层的中尺度断裂主要为明显褶曲,利用曲率属性能够清晰的进行检测^[15]。选取不同道间距来计算曲率属性,能够刻画不同尺度的断裂。多道间距(>20 道)计算的曲率属性主要反映较大尺度断裂,例如北东向、北北东向主干断层;中道间距(10 道左右)计算的曲率属性能反映中尺度的断裂或构造,例如主干断裂伴生的北西向中尺度断层以及断裂带之间的微幅度构造,为中、小断裂的精细研究提供了可靠的参考依据。

图 4 中,顺南三维曲率属性图上北东向主干走滑

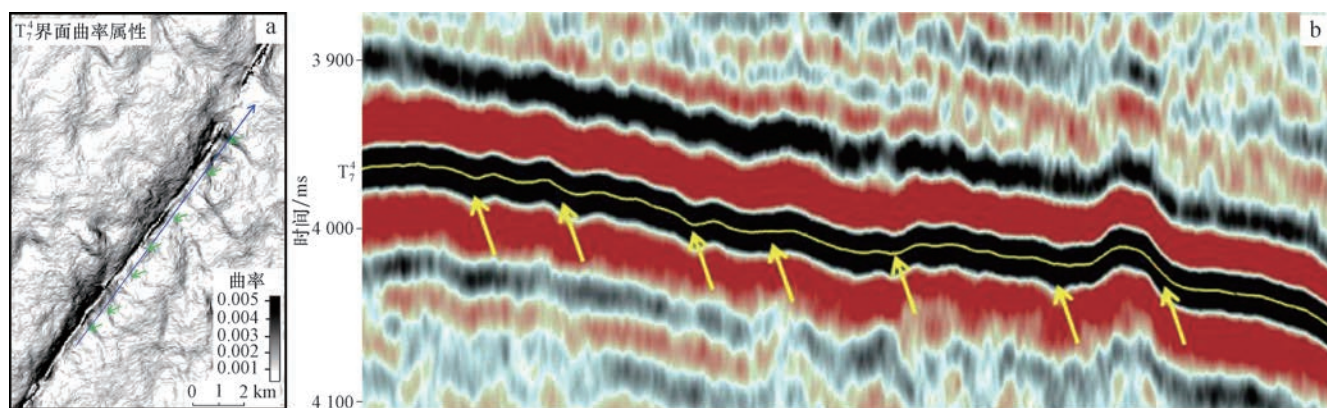


图4 顺南地区三维地震工区 W1 断裂带伴生断裂平面(a)及剖面(b)特征
Fig. 4 Associated fracture characteristics in plane view(a) and seismic profile(b) of W1 faults zone in 3D seismic volume, Shunnan area

断裂 W1 右侧伴生一系列北西向次级断裂,雁列展布;地震剖面上 T_7^4 地震反射波同相轴表现为不同程度的褶曲变形。断裂识别模式中,当 T_7^4 同相轴表现为褶曲明显时,碳酸盐岩表层发育中尺度断裂,以及沿断裂伴生的裂缝。

2.3 小尺度断裂预测

1) 蚂蚁追踪技术

蚂蚁算法是在地震数据体中播撒大量的蚂蚁,在地震属性体中发现满足预设断裂条件的断裂痕迹的蚂蚁将“释放”某种信号,召集其他区域的蚂蚁集中在该断裂处对其进行追踪,直到完成该断裂的追踪和识别,最后获得一个低噪声、具有清晰断裂痕迹的数据体^[16]。

蚂蚁追踪有初始蚂蚁边界、蚂蚁的拐弯能力、蚂蚁搜索步长、合法步长、非法步长、终止标准、搜索的倾角及方位角等七项参数。初始蚂蚁边界定义了数据体内设置的蚂蚁数量,即蚂蚁密度。对不同级别的断裂,设置参数不同,边界范围一般在 3~8 即可。拐弯能力对于陡立断层,不需要设置大的拐弯参数,但倾斜变化的断裂,则值越大效果越好^[17]。步长反映蚂蚁探测的距离,值越大计算速度越快,但可能忽略小断层。

顺南三维地震工区沿 T_7^4 层面蚂蚁体技术能清晰刻画北东向主干走滑断裂带及其裂缝发育特征。裂缝主要发育在主干断裂带两侧及断裂的交汇部位,平面上呈网状分布。

2) 最大似然法

最大似然法是一种对叠后地震数据进行小断层及裂缝检测的技术,能利用走向滤波算法提高断层边界

及断点的成像精度。在指定的倾角、走向范围内,计算每个采样点之间的相似性,通过对相似性进行概率分析以获得研究区断层及断裂发育的最大可能性,进而生成断层(裂缝)走向体、断层(裂缝)倾向体及断层(裂缝)最大似然体,达到识别描述断层及裂缝的目的。最大似然检测对于小尺度断裂较为敏感,与蚂蚁追踪技术所识别断裂尺度相似,在目前研究中基本属于叠后地震资料能够识别的最小尺度。

图5为最大似然法检测的 W4 断裂带效果图,剖面上红色断裂代表主干断裂,对应平面红色断裂多边形解释结果。剖面上最大似然检测出的小断层,对应平面上黑色异常区。可以看出,在强变形区及断裂交汇部位,构造活动强烈,小断层最发育;相对弱变形区小断层发育程度相对低。

3 断裂带描述与评价

3.1 断裂带描述

顺南地区不同断裂带发育特征存在差异,以趋势面、相干、曲率、蚂蚁追踪、最大似然法检测为主的断裂检测技术组合,实现了叠后走滑断裂带的断面、边界、隐蔽断裂的高精度识别及刻画,也反映了断裂带的性质、分段性与发育强度,为断裂的解释及描述提供依据。利用趋势面与相干的技术组合检测来反映断裂样式与走向,指导北东向走滑断裂地震剖面精细解释。趋势面与相干属性中,展示北东向 W4 断裂带为主断裂,断裂带分段性强,张扭段负花样式与压扭段正花样式交替出现。曲率属性检测出多条沿北东向走滑断裂发育的北西向次级断裂,呈雁列式展布,次级断裂的边界表示主干断裂带的影响范围。蚂蚁追踪与最大似然

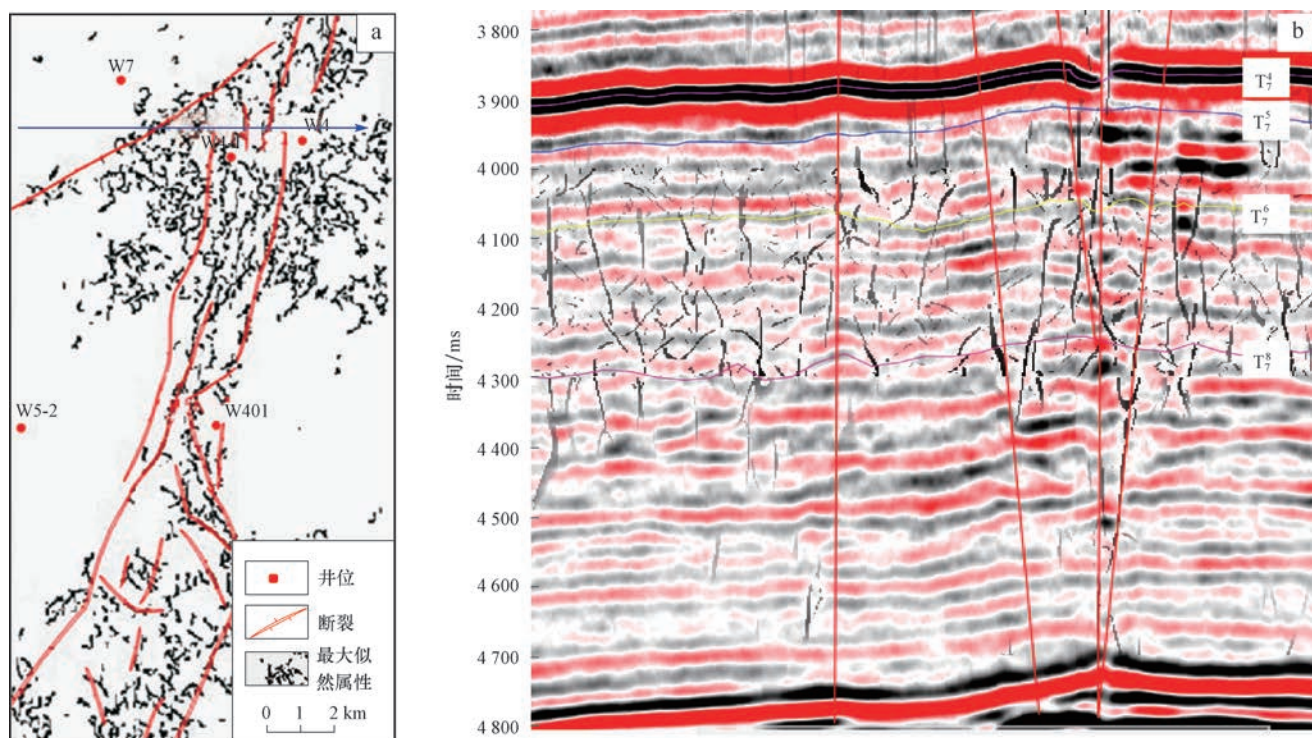


图5 顺南地区 W4 断裂带最大似然法检测小断层、裂缝平面(a)及剖面(b)特征

Fig. 5 Characteristics of the fracture zone's maximum likelihood test results for plane views (a) and seismic profile (b) in Shunnan area

法的技术组合检测结果表明小断裂及裂缝集中发育在主干断裂带附近及断裂的交汇部位,对于储层评价具有重要意义。

3.2 断裂带评价

顺南地区发育受断裂带控制的裂缝型、裂缝-洞穴型和裂缝-孔洞型储集体。已钻井分析表明,具有“串珠”反射结构的裂缝-洞穴型储集体易发生放空和漏失,天然气累产量也较高。对顺南三维地震工区的北东向走滑断裂进行三维空间立体雕刻,发现“串珠”强反射多分布在断裂交汇处及走滑断裂分段的负花状部位。裂缝型储集体主要分布在断裂带边界内及其交汇处。综合钻井资料及地质模型分析认为,走滑断裂为张扭性质时,是裂缝-洞穴储层发育最有利部位,同时张扭性质负花状断裂为开启状态并深入基底,是油气运移的有利通道;走滑断裂分段性的平移段和压扭段发育裂缝型、裂缝-孔洞型储层,储层规模和物性次于张扭部位。

通过对不同尺度断裂识别、对断裂带整体特征的精细描述,结合储层预测结果,划分出断裂带控制下的有利储层发育区,实现对走滑断裂带控制下的裂缝-洞穴型储集体综合评价,用于指导工区的区带及目标优选。

4 结论

1) 通过开展中下奥陶统顶面和内幕不同尺度断裂带正演模拟,明确了断裂的地震响应特征;初步建立了顺南地区不同尺度断裂的识别模式及量化标准,探索形成了不同尺度断裂的地震预测及描述方法。

2) 不同的地震属性对断裂尺度识别的敏感度不一样。地震常规解释及相干体属性不易识别的扰曲、褶皱、性质等现象可以通过曲率、趋势面属性进行刻画,更小级别的裂缝发育带可以通过蚂蚁追踪和最大似然法检测。

参考文献

- [1] 何治亮,金晓辉,沃玉进,等. 中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域[J]. 中国石油勘探,2016,21(1):3-14.
He Zhiliang, Jin Xiaohui, Wo Yujin, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration domains of ultra-deep marine carbonates in China[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(1): 3-14.
- [2] 金之钧,朱东亚,胡文瑄,等. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响[J]. 地质学报,2006,80(2):245-253.
Jin Zhijun, Zhu Dongya, Hu Wenxuan, et al. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin[J]. Acta Geological Sinica,

- 2006, 80(2): 245–253.
- [3] 杨圣彬, 刘军, 李慧莉, 等. 塔中北围斜区北东向走滑断裂特征及其控油作用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 797–802.
Yang Shengbin, Liu Jun, Li Huili, et al. Characteristics of the NE-trending strike-slip fault system and its control on oil accumulation in north peri-cline area of the Tazhongpaleouplift[J]. Oil & Geology, 2013, 34(6): 797–802.
- [4] 陈明政, 李宗杰, 王保才. 塔中顺南沙漠区碳酸盐岩天然气藏三维地震勘探技术[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 935–943.
Chen Mingzheng, Li Zongjie, Wang Baocai, 3D seismic exploration technology of carbonate gas reservoir in Shunnan desert area of central Tarim Basin[J]. Oil & Geology, 2014, 35(6): 935–943.
- [5] 覃天. 多属性相干方法识别微小断层[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(5): 538–542.
Qin Tian, Identification of minor fault based on multi-attribute seismic coherence technology[J], Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008, 5(5): 538–542.
- [6] 王彦君, 雍学善, 刘应如, 等. 小断层识别技术研究及应用[J]. 勘探地球物理进展, 2007, 30(2): 135–139.
Wang Yanjun, Yong Xueshan, Liu Yingru, et al. Identification of minor fault and its applications[J], Progress in Exploration Geophysics, 2007, 30(2): 135–139.
- [7] 赵迎月, 顾汉明, 李宗杰, 等. 塔中地区奥陶系典型地质体地震识别模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(6): 1262–1270.
Zhao Yingyue, Gu Hanming, Li Zongjie, et al. The seismic wave field recognition mode of typical geological bodies in the Ordovician in Tazhong area[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(6): 1262–1270.
- [8] 宋桂桥, 马灵伟, 李宗杰. 基于随机介质正演模拟的塔中顺南地区风化壳储层地震响应特征分析[J]. 石油物探, 2013, 52(3): 307–312.
Song Guiqiao, Ma Lingwei, Li Zongjie. The weathering crust reservoir seismic response characteristics analysis in Shunnan area of central Tarim Basin based on random medium forward modeling[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(3): 307–312.
- [9] 王保才, 刘军, 马灵伟, 等. 塔中顺南地区奥陶系缝洞型储层地震响应特征正演模拟分析[J]. 石油物探, 2014, 36(3): 258–267.
Wang Baocai, Liu Jun, Ma Lingwei, et al. Forward modeling for seismic response characteristics of the Fracture-cavity Ordovician reservoir in Shunnan area of central Tarim Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 36(3): 258–267.
- [10] 马灵伟. 塔中顺南地区缝洞型储层地震响应特征及识别模式研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2014.
Ma L W. Seismic response characteristics and recognition pattern of the Ordovician Fractured-vuggy reservoirs in Tazhong Shunnan area[D]. Wu Han: China University of Geosciences(Wu Han), 2014.
- [11] 李宗杰. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型储层模型与预测技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
Li Zongjie, Study on the fracture-cave carbonate reservoir model and the prediction technique of Tahe Oilfield[D], Cheng Du: Chengdu University of Technology, 2008.
- [12] 许辉群, 桂志先. 边缘检测技术在石油勘探中的研究进展[J]. 特种油气藏, 2011, 18(4): 7–10.
Xu Huiqun, Gui Zhixian. Progress of edge detection technology in seismic exploration[J], Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(4): 7–10.
- [13] 钟学彬, 刘军, 等. 基于多属性的断层综合解释技术研究[J]. 新疆地质, 2013, 31(S): 87–90.
ZhongXuebin, Liu Jun et al. The study of fault interpretation technology based on multi attribute[J], Xinjiang Geology, 2013, 31(S): 87–90.
- [14] Roberts A. Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons[J]. First Break, 2001, 19(2): 85–100.
- [15] 王世星. 高精度地震曲率体计算技术与应用[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(6): 965–972.
Wang Shixing. High-precision calculation of seismic volumetric curvature attributes and its applications[J], Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(6): 965–972.
- [16] 任丽丹, 张开拓, 龚伟. 蚂蚁追踪技术在塔中卡塔克隆起区的应用[J]. 西部探矿工程, 2014, 26(1): 80–82.
Ren Lidan, Zhang Kaituo, Gong Wei. Application of ant tracking in Kartake Uplift of Ta Zhong area[J], West-China Exploration Engineering, 2014, 26(1): 80–82.
- [17] 杨子川, 刘军, 陈黎, 等. 顺南地区奥陶系碳酸盐岩储层地震识别与评价[J]. 石油物探, 2017, 56(2): 280–287.
Yang Zichuan, Liu Jun, Chen Li, et al. Seismic identification and evaluation of Ordovician carbonate reservoir in Shunnan area[J], Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(2): 280–287.

(编辑 张玉银)