

# 碳酸盐岩断溶体构型地震表征关键技术及应用

常少英<sup>1,2</sup>, 崔仕提<sup>3</sup>, 曹鹏<sup>1,2</sup>, 王孟修<sup>1</sup>, 崔钰瑶<sup>2</sup>

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油大学(北京); 3 中国石油塔里木油田勘探开发研究院

**摘要** 针对弱能量断溶体不易识别、断溶体连通性不清晰,以及“小串珠”产量高、“大串珠”产量低,“低串珠”产油、“高串珠”产水等生产问题,在断溶体构型地质模式认识的基础上,利用动态、静态生产资料,进行断溶体几何外形特征、规模及内部岩相的表征,进而探究断溶体轮廓及内部结构刻画的可能性。介绍了3项断溶体内部结构量化描述技术:①应用地震波形分解技术去除上覆地层强反射特征,凸显弱能量断溶体;②应用频率域多尺度断裂检测技术描述断溶体边界;③应用断溶体缝洞岩相反演技术识别断溶体内部岩相分布。碳酸盐岩断溶体构型地震表征关键技术为断溶体油藏高效井位优选提供了新的思路,支撑了断溶体油藏由点状溶洞向三维立体断溶体的开发思路转变,钻井成功率由75%左右提升到94%。

**关键词** 碳酸盐岩; 断溶体; 缝洞结构; 波形分解; 多尺度断裂检测; 岩相反演

**中图分类号**: TE132.1 **文献标识码**: A

## 0 前言

随着勘探的不断深入,深层油气藏逐步成为油气勘探开发的重点领域。断溶体油藏是深层勘探的一种重要油藏类型。目前,关于断溶体储层的成因机理主要有两种:一种是地下水顺着深大断裂带渗流,对断裂破碎带进行溶蚀改造,即由大气水补给驱动的同生水循环模式;另一种是由火成岩活动驱动的远端热液模式。通过这两种模式形成具有复杂三维空间结构的岩溶缝洞系统,当油气沿断裂向溶蚀破碎带运移时,在上覆泥灰岩或侧向致密石灰岩的封挡下,油气聚集形成特殊圈闭类型的油气藏<sup>[1-2]</sup>。不管是哪种成因模式,断裂特别是走滑断裂在断溶体成储、成藏方面都起着关键作用,并且走滑断裂样式的变化控制着断溶体规模的变化<sup>[3-4]</sup>。

在勘探开发实践中,前期研究者将储集体类型划分为孤立洞穴型、缝洞型、裂缝孔洞型,主要采用直井钻探串珠状溶洞,然而实际生产中发现相邻的串珠之间油气开发特征差异显著。目前,研究者对断溶体的认识转变为以断裂带为中心<sup>[5-10]</sup>,指出了断溶体与走滑断裂之间的关系、断溶体模型特征,

划分不同的断溶体圈闭类型进行开发,取得了较好的开发效果<sup>[10-13]</sup>。但是,该类油藏依旧面临着诸如弱能量断溶体不易识别、断溶体连通性不清晰,以及“小串珠”产量高、“大串珠”产量低,“低串珠”产油、“高串珠”产水等实际生产问题,归根到底是由于断溶体构型表征不清楚。

物探解释技术是量化认识和评价断溶体的重要手段。马乃拜等<sup>[14]</sup>介绍了断溶体地震反射特征与识别方法,但对断溶体内部结构的刻画方法表述较少;程洪等<sup>[15]</sup>总结了断溶体构型类型及表征方法,提出了断溶体空间刻画方法,但没有考虑地层界面的地震波对小尺度缝洞体地震响应的屏蔽作用,致使断溶体内部刻画不够精细。

本文在断溶体构型地质模式认识的基础上,利用动态、静态生产资料,进行断溶体几何外形特征、规模及内部岩相的表征,主要应用了3项关键技术:①应用地震波形分解技术去除上覆地层强反射特征,凸显弱能量断溶体;②在频率域利用多尺度断裂检测技术来描述断溶体边界;③应用断溶体缝洞岩相反演技术识别断溶体轮廓及内部结构。断溶体构型地震表征技术为断溶体油藏高效井位优选提供了

收稿日期:2021-05-06; 改回日期:2021-08-18

本文受中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目“复杂碳酸盐岩储层结构表征关键地球物理技术研究”(编号:2021DJ3701)、“海相碳酸盐岩有效储层形成与保持机理及分布预测研究”(编号:2021DJ0503),中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“碳酸盐岩油气藏提高采收率关键技术研究”(编号:2021DJ1501)联合资助

**第一作者**: 常少英,高级工程师,主要从事地质-地球物理储层预测工作。通信地址:310023 浙江省杭州市西溪路920号 中国石油杭州地质研究院;E-mail:changsy\_hz@petrochina.com.cn

新的思路,对油气勘探阶段有利储集体的预测和开发阶段剩余油预测挖潜都具有十分重要的意义。

## 1 断溶体构型地质模型

走滑断裂控制断溶体纵向发育,常常形成十分复杂的3D网络样式。由于构造变形对应力的吸收,应力强度沿着走滑断裂在逐渐变化,它控制了断裂活动强弱及演化程度。在靠近主压应力方向,断裂活动强度大,演化程度高,主干走滑断裂多为辫状构造样式;远离主应力方向,断裂活动强度小,演化程度也相对较低,主干断裂多为雁列构造样式;在断裂末端应力完全释放,发育马尾状构造样式。马尾状构造不仅发育在主干走滑断裂的末端,同时在雁列断层、辫状断层末端也会发育。不同部位的断裂发育程度不同,溶蚀程度及胶结作用也存在差异。断溶体可划分成断溶体主断裂区、破碎带、围岩带,而溶蚀程度相对低、胶结作用强的部位发育低渗透障壁分隔带<sup>[16-18]</sup>。由于分隔带的分割作用,造成了明显的油气差异化富集,从而影响了开发效果。

通过勘探实践,依据走滑断裂控储规律及其结构样式<sup>[19-22]</sup>,总结了4类断溶体地质构型模式(图1),分别是:①帚状断溶体。多发育于断裂交会区或断裂末端的“马尾”区,在平面图中断裂交会于一处,断裂活动强,主干与分支断裂连通,断溶体规模大,裂缝十分发育,储集体连通概率大。②辫状断溶体。受控于辫状主干断裂,辫状断裂多发育在断裂活动较强的区域,处于走滑断裂演化的较成熟阶段。沿断裂发育的储集体之间连通概率高,断溶体规模大。③雁列式断溶体。受控于雁列排布的剪切断裂,在深层共用一个主干断裂,到浅层逐渐散开呈雁列式排布,剖面上形成正花状构造样式。当油气沿主干断裂向各分支断层运移时,可以在各断溶体中得以保存,最终形成雁列式排布的孤立油气藏。每一条雁列断层控制一个断溶体,沿单条断裂储集体连通概率大。由于各雁列断层间并未发育连接断层,未遭受断裂破坏,岩性致密的地层可形成侧向遮挡。④线状断溶体。为线性断裂控制的断溶体,主干和分支断裂均可发育,为碳酸盐岩最基本的圈闭类型。由于线性断裂的活动较弱,控制溶蚀的范围有限,小的断溶体可以只发育一个“串珠”,大的断溶体长度往往不超2 km,溶蚀深度在1.5 km以内,在三维空间中呈立体不规则的形态。线状及雁列式断溶体连通性较差,天然能量不足或微弱。

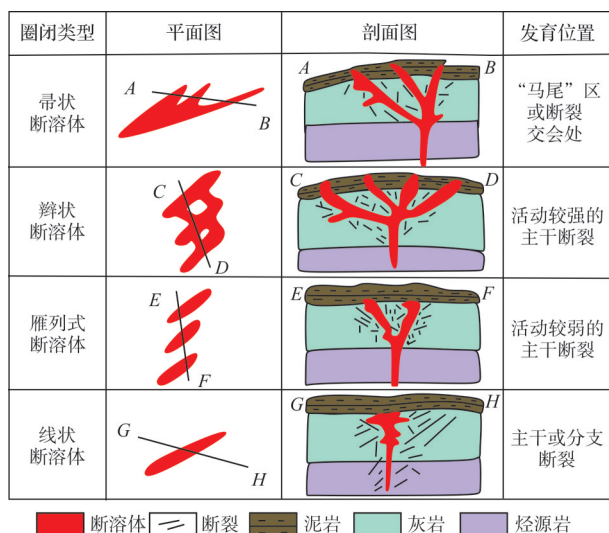


图1 断溶体圈闭类型模式图

Fig. 1 Pattern diagram of fault-karst trap type

## 2 断溶体内部结构量化描述技术

通过对实际生产问题的分析,发现断溶体构型精细表征对解决目前面临的问题具有较好的效果。断溶体构型精细表征主要包括以下3个方面的技术内涵:断溶体内部弱能量储层地震识别、断溶体边界频率域多尺度断裂检测、断溶体缝洞岩相反演。

### 2.1 断溶体内部弱能量储层地震识别

目前,断溶体的识别主要是在地震剖面上找强串珠状反射特征。在实际生产中,并不是强反射规模越大开发效果越好,而是通常有“小串珠”产量高、“大串珠”产量低的现象,而“小串珠”因其反射能量较弱,往往容易被忽视,因此如何寻找内部弱振幅响应特征的断溶体并将其结构刻画出来是高效开发该类油藏面临的难点。通过研究发现,在断溶体发育区,上覆地层往往是较厚的泥岩地层,其与碳酸盐岩地层的接触界面往往是稳定的强反射特征。这种区域性稳定的强反射往往会对下伏储层的地震响应特征有屏蔽作用而导致难以识别。针对这种情况,采用地震波形分解技术来去除地层强反射特征,凸显岩溶储层的弱地震响应特征。

地震波形分解技术的思路是将地震波形视作不同形态子波的叠加<sup>[23]</sup>。具体实施过程为:首先,对叠后数据进行分解,将地震道中某个目标层段的地震波分解成不同分量,即分解成不同主频和能量的雷克子波,第1分量代表了在所有输入的地震数

据段中具有最大共性、最大能量的波形,其地质意义则反映了研究区最大一级沉积相的地层在岩性、岩相和地层结构类型上的综合地震响应特征,其振幅属性则反映了这一综合特征在该区的分布形态。其次,将所有分解得到的雷克子波进行重构,再得到和原始地震道极为相似的地震道。最后,从原地震道中去除第1分量的雷克子波,用剩下的雷克子波重构得到新的数据体,最终用以反映目标地质体的反射系数所产生的地震波。

上述过程实际上是一个滤波的过程,即去除了低频的特征,凸显了小断距断裂的地震响应特征。利用以上波形分离法去除断溶体上覆地层强反射

的地震波形,剩余地震波形中原始弱反射地震波得到增强,可以很好反映出断溶体内部弱反射储层的发育特征,同时可以使地震剖面上的断裂点更加清晰。如图2a为塔北Ha6井区块鹰山组原始地震剖面,图2b为去除了强反射的地震剖面,除了①、②号部位储层响应特征外,在图2b中发现了新的③号部位储层响应特征。如图3所示,对地震波形分解后的数据体提取均方根振幅属性沿层切片,哈拉哈塘地区一间房组顶部岩溶储层的平面分布特征有了较大的变化,发现了新的储层分布:技术应用后的图3b与技术应用前的图3a相比,在红色箭头标识处增加了大量的点状岩溶储层强能量振幅响应特征。

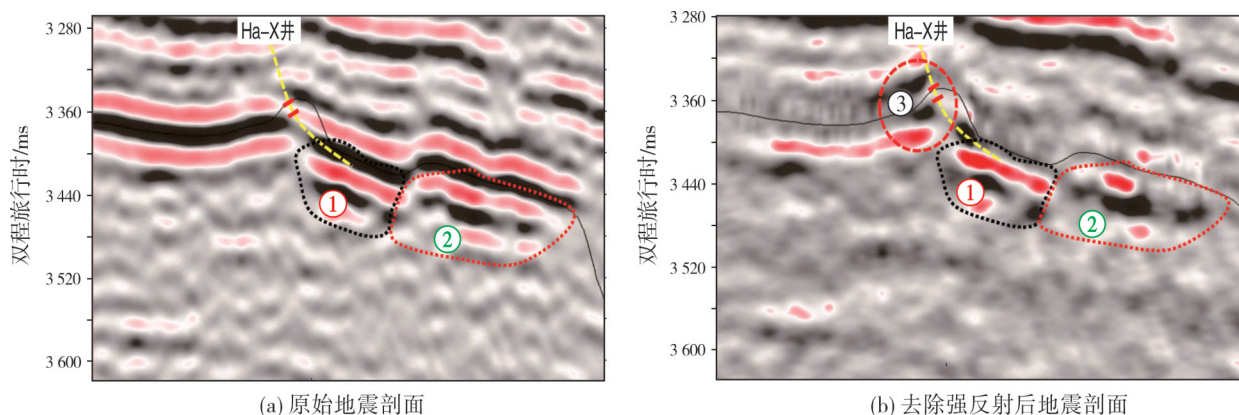


图2 岩溶储层地震波形分解前后剖面对比

Fig. 2 Comparison of profiles showing fault-karst reservoir before and after seismic waveform decomposition

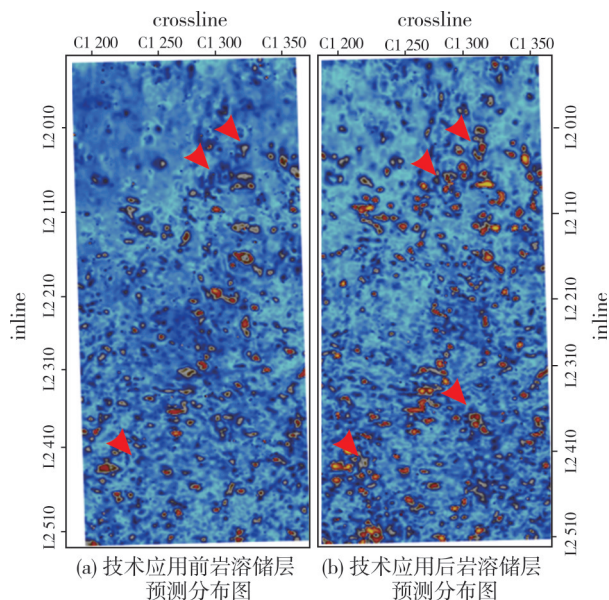


图3 岩溶储层地震波形分解前后属性平面图对比

Fig. 3 Comparison of attribute plans showing fault-karst reservoir before and after seismic waveform decomposition

## 2.2 断溶体边界频率域多尺度断裂检测

常规断裂识别方法比如相干体,其通过计算纵向和横向局部波形的相似性,考虑了地震数据的极性、振幅、相位的相似性,来表征地层边界、特殊岩性体的不连续性,对地震信号明显的不连续性能够有效揭示,成为三维地震资料解释的常用手段之一。但是常规的振幅相干体的分辨率比较低,而且抗噪性较差,这极大的制约了相干体技术在精细勘探中的应用。塔里木盆地、四川盆地发现的断溶体油藏多发育走滑断裂,断距往往较小,其地震响应特征较弱。因此,需要一种对于小断距走滑断裂识别更敏感的方法。

频率域多尺度断裂检测新方法通过高分辨率的频谱分解,生成一系列单频体(10 Hz、15 Hz、20 Hz、25 Hz、30 Hz……),不同频率对不同尺度的地质体具有较好的敏感性,可以得到其相应的振幅体和

相位体。然后对不同频率的振幅体和相位体进行边缘增强,识别不同频率的波形、振幅和相位等多种优选的不连续性属性。由于原始地震数据包含了倾角、方位角等信息,将原始地震数据沿着一组走向和倾角,计算每一点最低的相似度,检测到的断裂在剖面上比第三代属性技术(如蚂蚁体、相干属性)的处理结果显示出更强的连续性,针对相似性做全区归一,使之更能够反映断层的线性关系。最终的最大似然断裂数据体更加接近断裂的原貌,在地震反射轴错断和变形的区域都能够刻画出断裂,通过自适应的主成分分析法得到反映不

同尺度的断裂检测属性体,在剖面上更加接近人工解释的断裂。如图4a为常规相干技术断裂识别效果剖面图,图4b为频率域多尺度断裂检测效果剖面图,图中红色箭头标识处,显示新方法对断裂发育特征刻画得更为清晰。在平面上,应用常规相干技术得到的断裂分布带能量不聚焦(图5a),噪音没能够得到压制,断裂不够清晰;而应用新方法得到的断裂检测数据体(图5b),断裂边缘清晰,微断裂得到识别,技术的抗噪性也较强。新方法的优点在于实现了对弱地震响应的断裂识别,能更好、更精确地提供断裂信息。

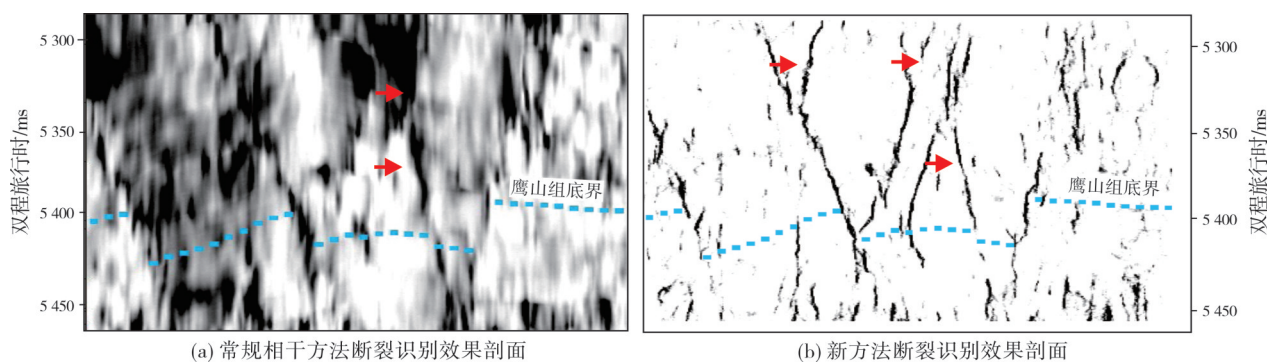


图4 频率域多尺度断裂检测技术应用前后剖面对比

Fig. 4 Comparison of profiles showing fracture before and after multi-scale fracture detection in frequency domain

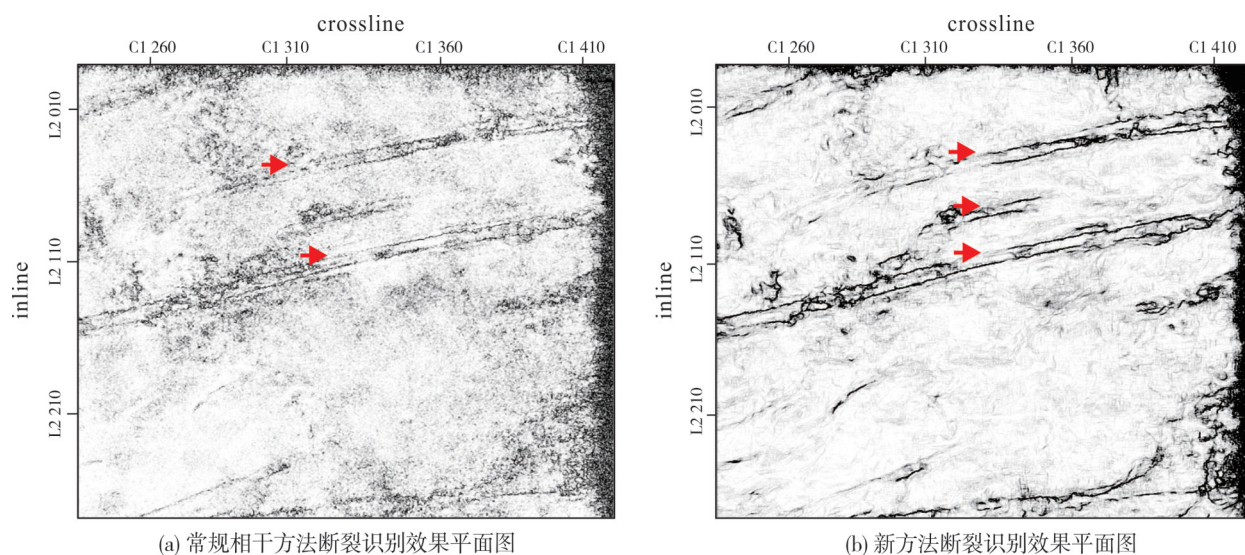


图5 频率域多尺度断裂检测技术应用前后平面图对比

Fig. 5 Comparison of attribute plans showing fracture before and after multi-scale fracture detection in frequency domain

## 2.3 断溶体缝洞岩相反演

断溶体发育孔、洞、缝等多种储集空间类型,非

均质性极强。定量刻画断溶体及其物性在三维空间的展布一直是该类油藏开发亟待解决的难题<sup>[24-26]</sup>。本文结合地质、测井先验信息,集成了断溶

缝洞岩相反演技术:首先进行多井岩相分类,划分出主断裂岩溶相、岩溶缝洞相、断裂破碎相、致密岩相(隔挡层岩相)等4类岩相,通过对不同岩相与测井参数的分析(图6),可以看出不同岩相表现出不同的伽马、电阻率及纵波阻抗特征。主断裂岩溶相呈中—低伽马、中—高电阻率和高波阻抗特征;

岩溶缝洞相呈低伽马、高电阻率、高波阻抗特征;断裂破碎相呈低伽马、高电阻率、中—低波阻抗特征;致密岩相(隔挡层岩相)以低伽马、高电阻率和低/高波阻抗为特征。然后利用不同岩相的波阻抗分布特征,建立波阻抗与岩相之间的统计关系,通过“云变换”到缝洞储集体的岩相数据体,从岩相的角度

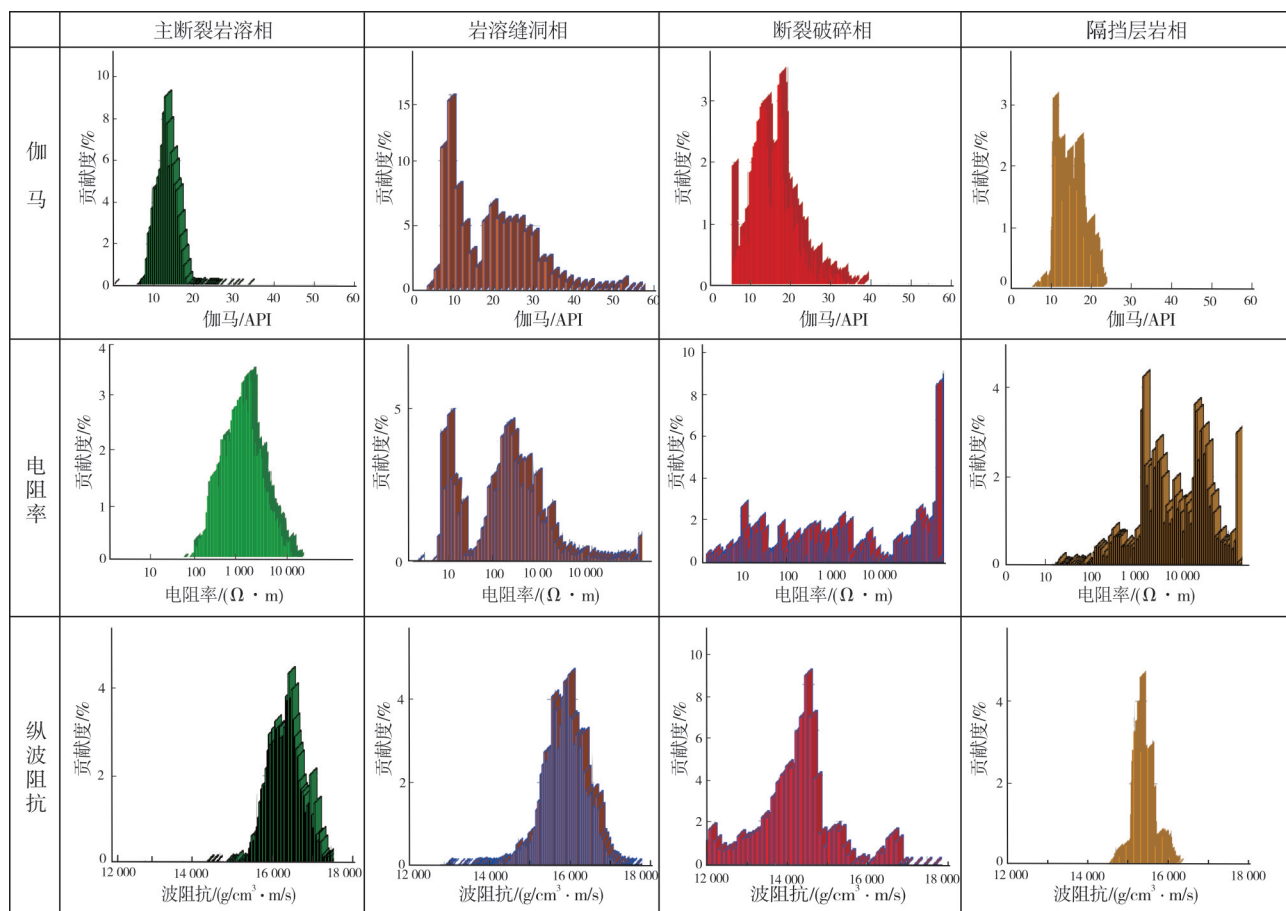


图6 岩相岩石物理分析图版  
Fig. 6 Lithofacies petrophysical analysis chart

定量评价缝洞储集体的空间非均质性。

与常规方法对比,该方法的评价结果与井点解释岩相有较高的吻合度,井间趋势上更加依赖地震响应特征,是一种地震数据主控的储集体岩相评价方法。如图7a为原始地震剖面,图7b为断溶体岩相地震预测剖面,后者对原始地震剖面上的串珠状响应特征进行了内部结构识别,红色代表主断裂岩溶相,橙色代表岩溶缝洞相,黄色代表断裂破碎相,黑色代表致密岩相(隔挡层岩相),实现了对断控缝洞储层内部结构的精细划分。该项技术对于强非均质油藏的物性发育规律评价具有指导意义。

### 3 应用效果

哈拉哈塘油田位于塔北隆起斜坡区,中下奥陶统主要发育裂缝、洞穴和孔洞3类储集体,储层发育规模受控于多期活动的走滑断裂体系及顺断裂的溶蚀作用<sup>[27]</sup>,为典型的断溶体油藏;埋藏较深(>5 500 m),发育玉尔吐斯组烃源岩,油源断裂发育,油气成藏条件优越。目的层各组地层较平缓,表现为向东南方向倾斜的单斜构造,现今构造面貌是多期构造运动叠加改造的结果,断裂展布及发育受控于多期次的构造运动。

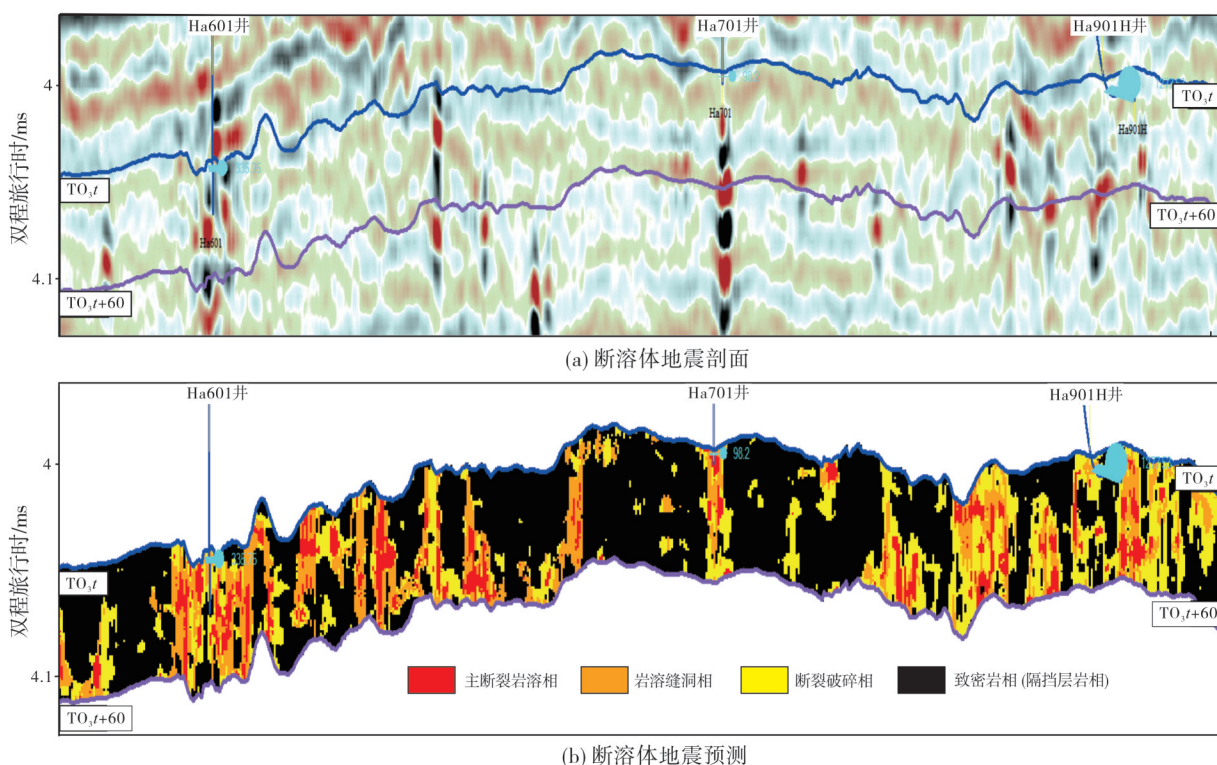


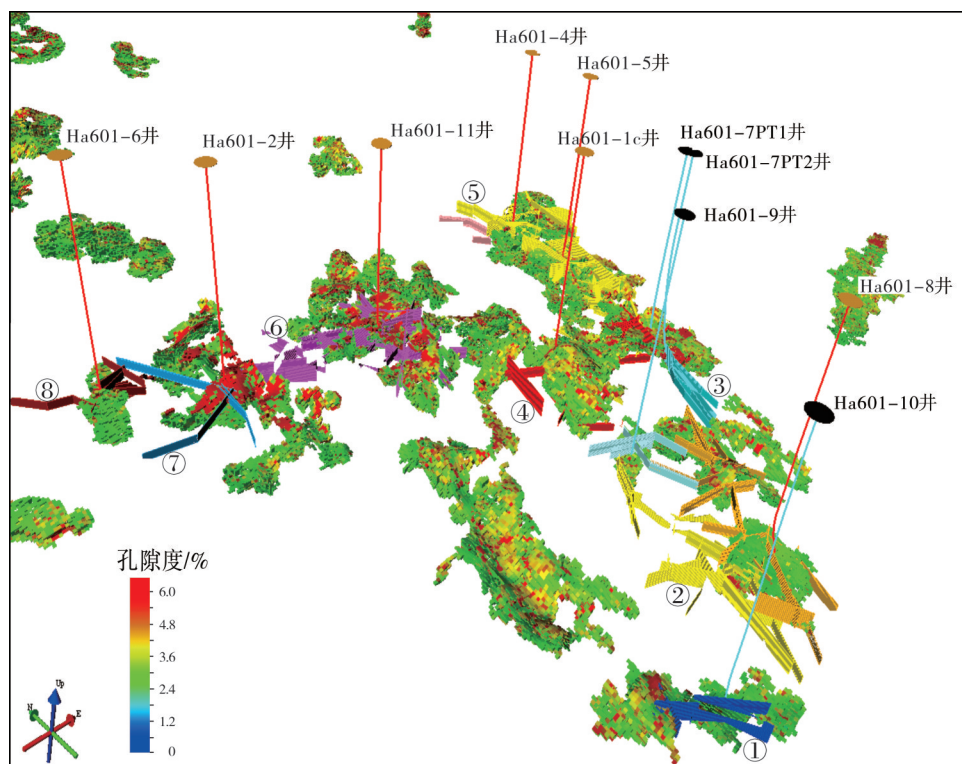
图7 断溶体岩相地震预测剖面

Fig. 7 Profiles showing seismic prediction effect of fault-karst lithofacies

断溶体具有强烈的非均质性:横向沿断裂带分布,具有分段性;纵向成网状分布,具有不规则性。断溶体构型地震表征技术一个重要的应用就是识别断溶体储层的连通性。断溶体油气藏的复杂性给钻探带来巨大困难<sup>[21]</sup>。由于钻头尺寸小,直接命中主体储集体的概率非常低,往往需要采用大型酸压沟通储集体来获得工业油气流,从而大大增加了勘探开发成本。因此,储层的连通性描述在钻探过程中就显得格外重要。通过断溶体构型地震表征技术描述储集体的连通性可以为寻找规模储集体、描述缝洞单元、优化钻井设计、提高钻探的命中率提供依据,为油气勘探开发节约成本。具体做法是:利用断溶体构型地震表征技术得到的断溶体岩相,再应用不同岩相的波阻抗值与孔隙度的拟合关系,得到孔隙度体,将孔隙度体重新采样到缝/洞三维构造地质建模的网格中进行量化,并根据同一网格、缝/洞优先的原则,将缝/洞和杂乱反射地震相合并成为一个缝洞体。然后在这个缝洞体的基础上根据网格是否相连进行搜索,求得缝洞连通体(图8)。

动态干扰试井测试结果表明,Ha601-6井组与Ha601-2井组之间相互连通,与静态刻画结果相吻合。如Ha601-6井压力过程可分为3个阶段:阶段1压力下降,阶段2压力上升,阶段3压力再次下降,与Ha601-2井的注水周期一致,表明这两个井组之间是连通的。对于这种连通面积非常大的断溶体油藏可借鉴碎屑岩开发经验,后期通过低注高采建立“注采井网”,采取“一井多靶”、大斜度井的方式来提高储集体钻遇率,增加效益。Ha601-6井组与Ha601-2井组圈闭总体积约为 $2\,000\times 10^4\text{ m}^3$ ,储量约为 $400\times 10^4\text{ t}$ 。

实际的开发特征也证实,Ha6断裂带北段的3口井Ha601-10井、Ha601-8井、Ha601-9井均不连通,它们的生产过程表现出不同的压力变化趋势,产能也有显著差异。Ha601-10井累产油 $12\times 10^4\text{ t}$ ,Ha601-8井累产油 $5.1\times 10^4\text{ t}$ ,Ha601-9井累产油仅有 $0.25\times 10^4\text{ t}$ ,表明这3口井处于3个孤立的断溶体油藏。由点状溶洞转变为三维立体断溶体的开发思路后,钻井成功率由75%左右提升到94%,为哈拉哈塘地区碳酸盐岩油藏开发打开了新局面。



注: 图中圈内序号为不同裂缝带编号。

图8 塔里木盆地哈拉哈塘油田 Ha601 井区断溶体连通图

Fig. 8 Connectivity diagram of fault-karst reservoir in Ha601 well area of Halahatang Oilfield, Tarim Basin

## 4 结 论

在断溶体构型地质模式认识的基础上,利用动态、静态生产资料,进行断溶体几何外形特征、规模及内部岩相的表征,形成了断溶体内部的弱能量储层地震识别技术、断溶体边界频率域多尺度断裂检测技术、断溶体缝洞岩相反演技术等断溶体油藏高效井预测技术系列。

(1)断溶体地震响应往往是断层、孔洞、裂缝与上覆地层的综合响应,去除上覆地层地震响应特征,能够挖掘断溶体内部结构弱振幅储层响应特征,这是断溶体内部精细刻画的重要基础工作。利用波阻抗与岩相之间的“云变换”刻画断溶体内部岩相分布特征,能够更好地进行断溶体的地震量化描述。

(2)断溶体油藏内部结构量化描述是该类油藏精细开发的必由之路,为规模目标优选、井轨迹优化、高效开发、措施建议等提供了直观的资料依据,有效地指导了多口井的部署。该技术是断溶体目标描述的有力手段。

## 参 考 文 献

- [1] 常少英, 庄锡进, 邓兴梁, 等. 断溶体油藏高效井预测方法与应用效果: 以 HLHT 油田奥陶系潜山区为例[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(增刊1): 199-206.  
CHANG Shaoying, ZHUANG Xijin, DENG Xingliang, et al. Fault-karst carbonate reservoir prediction: a case study in Ordovician buried hills, HLHT Oilfield[J]. Oil geophysical prospecting, 2017, 52(S1): 199-206.
- [2] 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 347-355.  
LU Xinbian, HU Wenge, WANG Yan, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & gas geology, 2015, 36(3): 347-355.
- [3] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 207-216.  
JIAO Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & gas geology, 2018, 39(2): 207-216.
- [4] 罗群. 断裂控烃理论的概念、原理、模式与意义[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(3): 316-324.  
LUO Qun. Concept, principle, model and significance of the fault controlling hydrocarbon theory[J]. Petroleum exploration and development, 2010, 37(3): 316-324.

- [5] 韩杰,袁源,肖春艳,等.塔中I号气田TZ83井区环状断溶体储层发育特征及油气聚集规律[J].海相油气地质,2020,25(3):234-242.  
HAN Jie, YUAN Yuan, XIAO Chunyan, et al. Development characteristics and oil-gas accumulation rules of fault-karst reservoir of TZ83 well area in Tazhong I gas field[J]. Marine origin petroleum geology, 2020, 25(3): 234-242.
- [6] 孙东,杨丽莎,王宏斌,等.塔里木盆地哈拉哈塘地区走滑断裂体系对奥陶系海相碳酸盐岩储层的控制作用[J].天然气地球科学,2015,26(增刊1):80-87.  
SUN Dong, YANG Lisha, WANG Hongbin, et al. Strike-slip fault system in Halahatang area of Tarim Basin and its control on reservoirs of Ordovician marine carbonate rock[J]. Natural gas geoscience, 2015, 26(S1): 80-87.
- [7] 李鹏飞,崔德育,田浩男.塔里木盆地塔北地区X区块断溶体刻画方法与效果[J].石油地球物理勘探,2017,52(增刊1):189-194.  
LI Pengfei, CUI Deyu, TIAN Haonan. Fault-karst carbonate reservoir description with GeoEast interpretation sub-system in the Tabei area, Tarim Basin[J]. Oil geophysical prospecting, 2017, 52(S1): 189-194.
- [8] 刘宝增,漆立新,李宗杰,等.顺北地区超深层断溶体储层空间雕刻及量化描述技术[J].石油学报,2020,41(4):412-420.  
LIU Baozeng, QI Lixin, LI Zongjie, et al. Spatial characterization and quantitative description technology for ultra-deep fault-karst reservoirs in the Shunbei area[J]. Acta petrolei sinica, 2020, 41(4): 412-420.
- [9] 郑晓丽,安海亭,王祖君,等.哈拉哈塘地区走滑断裂与断溶体油藏特征[J].新疆石油地质,2019,40(4):449-455.  
ZHENG Xiaoli, AN Haiting, WANG Zujun, et al. Characteristics of strike-slip faults and fault-karst carbonate reservoirs in Halahatang area, Tarim Basin[J]. Xinjiang petroleum geology, 2019, 40(4): 449-455.
- [10] 李萌,汤良杰,漆立新,等.塔北隆起南坡差异构造演化及其对油气成藏的控制[J].天然气地球科学,2015,26(2):218-228.  
LI Meng, TANG Liangjie, QI Lixin, et al. Differential tectonic evolution and its controlling on hydrocarbon accumulation in the south slope of Tabei Uplift[J]. Natural gas geoscience, 2015, 26(2): 218-228.
- [11] 朱光有,杨海军,朱永峰,等.塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气地质特征与富集成藏研究[J].岩石学报,2011,27(3):827-844.  
ZHU Guangyou, YANG Haijun, ZHU Yongfeng, et al. Study on petroleum geological characteristics and accumulation of carbonate reservoirs in Hanilcatam area, Tarim Basin[J]. Acta petrologica sinica, 2011, 27(3): 827-844.
- [12] 李映涛,漆立新,张哨楠,等.塔里木盆地顺北地区中一下奥陶统断溶体储层特征及发育模式[J].石油学报,2019,40(12):1470-1484.  
LI Yingtao, QI Lixin, ZHANG Shaonan, et al. Characteristics and development mode of the Middle and Lower Ordovician fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Acta petrolei sinica, 2019, 40(12): 1470-1484.
- [13] 漆立新.塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J].中国石油勘探,2020,25(1):102-111.  
QI Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin[J]. China petroleum exploration, 2020, 25(1): 102-111.
- [14] 马乃拜,金圣林,杨瑞召,等.塔里木盆地顺北地区断溶体地震反射特征与识别[J].石油地球物理勘探,2019,54(2):398-403.  
MA Naibai, JIN Shenglin, YANG Ruizhao, et al. Seismic response characteristics and identification of fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil geophysical prospecting, 2019, 54(2): 398-403.
- [15] 程洪,汪彦,鲁新便.塔河地区深层碳酸盐岩断溶体圈闭类型及特征[J].石油学报,2020,41(3):301-309.  
CHENG Hong, WANG Yan, LU Xinbian. Classifications and characteristics of deep carbonate fault-karst trap in Tahe area[J]. Acta petrolei sinica, 2020, 41(3): 301-309.
- [16] 鲍典,张慧涛.塔河油田碳酸盐岩断溶体油藏分隔性描述方法研究[J].新疆石油天然气,2017,13(1):25-30.  
BAO Dian, ZHANG Huitao. Description of the separation in fault-karst carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Xinjiang oil & gas, 2017, 13(1): 25-30.
- [17] 丁志文,汪如军,陈方方,等.断溶体油气藏成因、成藏及油气富集规律:以塔里木盆地哈拉哈塘油田塔河南岸地区奥陶系为例[J].石油勘探与开发,2020,47(2):286-296.  
DING Zhiwen, WANG Rujun, CHEN Fangfang, et al. Origin, hydrocarbon accumulation and oil-gas enrichment of fault-karst carbonate reservoirs: a case study of Ordovician carbonate reservoirs in South Tahe area of Halahatang Oilfield, Tarim Basin[J]. Petroleum exploration and development, 2020, 47(2): 286-296.
- [18] 高利君,李宗杰,李海英,等.塔里木盆地超深层碳酸盐岩规模储层分类对比及特征分析[J].地质论评,2020,66(增刊1):54-56.  
GAO Lijun, LI Zongjie, LI Haiying, et al. Classification and characteristic analysis of super-deep carbonate reservoirs in Tarim Basin[J]. Geological review, 2020, 66(S1): 54-56.
- [19] 苏劲,张水昌,杨海军,等.断裂系统对碳酸盐岩有效储层的控制及其成藏规律[J].石油学报,2010,31(2):196-203.  
SU Jin, ZHANG Shuichang, YANG Haijun, et al. Control of fault system to formation of effective carbonate reservoir and the rules of petroleum accumulation[J]. Acta petrolei sinica, 2010, 31(2): 196-203.
- [20] 万效国,邹光辉,谢恩,等.塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩断层破碎带地震预测[J].石油与天然气地质,2016,37(5):786-791.  
WAN Xiaoguo, ZU Guanghui, XIE En, et al. Seismic prediction of fault damage zones in carbonates in Halahatang area, Tarim Basin[J]. Oil & gas geology, 2016, 37(5): 786-791.
- [21] 彭守涛,何治亮,丁勇,等.塔河油田托甫台地区奥陶系一间房组碳酸盐岩储层特征及主控因素[J].石油实验地质,2010,32(2):108-114.  
PENG Shoutao, HE Zhiliang, DING Yong, et al. Characteris-

- tics and major controlling factors of carbonates reservoir in the middle Ordovician Yijianfang Formation, Tuofutai area, Tahe Oilfield[J]. *Petroleum geology & experiment*, 2010, 32(2): 108–114.
- [22] 潘文庆, 侯贵廷, 齐英敏, 等. 碳酸盐岩构造裂缝发育模式探讨[J]. *地学前缘*, 2013, 20(5): 188–195.
- PAN Wenqing, HOU Guiting, QI Yingmin, et al. Discussion on the development models of structural fractures in the carbonate rocks [J]. *Earth science frontiers*, 2013, 20(5): 188–195.
- [23] 常少英, 李世银, 乔占峰, 等. 碳酸盐岩风化壳岩溶地震弱振幅储层识别技术的应用: 以塔里木盆地TZ62井区为例[J]. *海相油气地质*, 2019, 24(3): 91–96.
- CHANG Shaoying, LI Shiyin, QIAO Zhanfeng, et al. Application of weak amplitude reservoir identification technology in karst reservoir of carbonate weathered crust: an example study of TZ62 well area in Tarim Basin[J]. *Marine origin petroleum geology*, 2019, 24(3): 91–96.
- [24] 鲁新便, 杨敏, 汪彦, 等. 塔里木盆地北部“层控”与“断控”型油藏特征: 以塔河油田奥陶系油藏为例[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(4): 461–469.
- LU Xinbian, YANG Min, WANG Yan, et al. Geological characteristics of “strata-bound” and “fault-controlled” reservoirs in the northern Tarim Basin: taking the Ordovician reservoirs in the Tahe Oilfield as an example[J]. *Petroleum geology and experiment*, 2018, 40(4): 461–469.
- [25] 王震, 文欢, 邓光校, 等. 塔河油田碳酸盐岩断溶体刻画技术研究与应用[J]. *石油物探*, 2019, 58(1): 149–154.
- WANG Zhen, WEN Huan, DENG Guangxiao, et al. Fault-karst characterization technology in the Tahe Oilfield, China [J]. *Geophysical prospecting for petroleum*, 2019, 58(1): 149–154.
- [26] 韩杰, 吴萧, 江杰, 等. 塔中 I 号气田西部鹰山组碳酸盐岩储层类型划分及储层连续性分析[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(1): 14–21.
- HAN Jie, WU Xiao, JIANG Jie, et al. Classification and continuity analysis on carbonate reservoir of the Yingshan Formation in the western Tazhong I Gasfield[J]. *Petroleum geology and recovery efficiency*, 2016, 23(1): 14–21.
- [27] 李国会, 袁敬一, 罗浩渝, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩缝洞型储层量化雕刻技术[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(4): 24–29.
- LI Guohui, YUAN Jingyi, LUO Haoyu, et al. Quantitative description technology for fracture-cavity carbonate reservoirs in Halahatang area, Tarim Basin[J]. *China petroleum exploration*, 2015, 20(4): 24–29.

编辑:黄革萍

## Key techniques and applications of seismic characterization of carbonate fault–karst configuration

CHANG Shaoying, CUI Shiti, CAO Peng, WANG Mengxiu, CUI Yuyao

**Abstract:** In view of the production problems such as difficult identification of deep-ultra deep weak energy carbonate fault–karst, unclear connectivity of fault–karst carbonate reservoir, as well as high yield of “small beads”, low production of “big beads”, “low beads” producing oil, and “high beads” producing water, on the basis of the understanding of the geological model of fault–karst configuration, the geometric shape characteristics, scale and internal lithofacies of fault–karst are characterized by using dynamic and static production data, and then the feasibility of depicting the outline and internal structure of fault–karst is explored. The quantitative description techniques are introduced as the following three aspects: (1) The seismic wave decomposition technique is applied to remove strong reflection in the overlying strata and highlight the response characteristics of weak energy fault–karst reservoir. It is an important basic work for fine description of the interior of the fault–karst. (2) The boundary of fault–karst is described by multi-scale fault detection in frequency domain, which realizes the fault identification of weak seismic response, and can provide better and more accurate fault information. (3) Combined with geological and logging information, the internal lithofacies distribution of fault–karst are identified by using fracture–cavity lithofacies inverse technique, so that the spatial heterogeneity of fracture–cavity reservoirs can be quantitatively evaluated from the perspective of lithofacies. The key techniques of seismic characterization of carbonate fault–karst configuration provide a new idea for efficient well location optimization of fault–karst reservoir. The drilling success rate of fault–karst reservoir is increased from about 75% to 94% after the development idea of reservoir is changed from point cave to three-dimensional fault–karst. In practice, the research results can be used to evaluate the connectivity of fault–karst reservoir, optimize efficient wells, tap the potential of remaining oil, and propose measures for fault–karst reservoir and improve oil recovery.

**Key words:** carbonate rock; fault–karst; fracture–cavity structure; multi-scale fracture identification; lithofacies inversion

**CHANG Shaoying**, First author: Senior Engineer, engaged in geological–geophysical reservoir prediction. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No.920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China