

塔中地区碳酸盐岩缝洞型储层叠前流体识别

鲜强¹,冯许魁¹,刘永雷¹,吕东¹,安海亭¹,蔡志东²,王祖君¹,苑恒超¹[1. 中国石油 东方地球物理公司研究院,新疆 库尔勒 841000; 2. 中国石油 东方地球物理公司
新兴物探开发处,河北 涿州 072750]

摘要:塔中地区奥陶系碳酸盐岩的储集空间是由裂缝和次生溶蚀孔洞组成的,其地震响应为“串珠状”反射。由于受到地表沙丘覆盖和埋藏深度较大的影响,导致地震资料信噪比较低、储层成像精度差。同时该储层油水关系复杂,利用叠后地震方法进行油气检测时,无法有效识别储层中的油水特征。以上难题严重制约了塔中地区碳酸盐岩勘探开发的进程。针对上述问题,基于塔中地区高密度地震资料开展了研究,由于高密度数据信噪比、储层成像精度相对较高,因此有利于进行缝洞体储层叠前烃类检测方法研究。首先,利用岩石物理建模得到了准确度较高的纵、横波速度;其次,对油气、水井进行 AVO 正演,正演结果表明不同类型井的 AVO 响应特征是有差异的,可以用 AVO 属性分析技术对碳酸岩储层流体识别;最后,利用叠前同时反演技术对研究区储层进行定量的流体预测,预测结果与该区试油成果对比分析,流体预测精度达到 83.3%,该方法为研究区内提升钻井成功率,降低油气勘探风险提供了有效的技术支持。

关键词:岩石物理建模;AVO 正演;叠前反演;缝洞型储层;碳酸盐岩;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Pre-stack fluid identification for fractured-vuggy carbonate reservoir in Tazhong area

Xian Qiang¹, Feng Xukui¹, Liu Yonglei¹, Lyv Dong¹, An Haiting¹, Cai Zhidong², Wang Zujun¹, Yuan Hengchao¹(1. Research Institute of BGP Inc., PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China; 2. Department of Emerging Geophysical
Exploration Development of BGP Inc., PetroChina, Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: The reservoir space of the Ordovician carbonates in Tazhong area, Tarim Basin, is mainly composed of fractures and secondary dissolved pores and cavities, and its seismic responses are bead-like reflections. The fact that the reservoir is covered by surface dunes and buried in depth leads to a relatively low signal-to-noise ratio of seismic data and the poor imaging precision for the reservoir. The oil-water contact is complex in the reservoir, making it hard to effectively identify its features by using post-stack hydrocarbon detection method. These problems have seriously restricted the progress of exploration and development of carbonate reservoirs in this area. In order to address these problems, we conducted research based on high-density seismic data in Tazhong area. As the high-density seismic data have higher signal-to-noise ratio and reservoir imaging precision, they are beneficial to study pre-stack hydrocarbon detection method for fractured-vuggy reservoirs. Firstly, more accurate P and S wave velocity can be worked out by Rock Physics Model. Secondly, AVO forward modeling of oil/gas and water wells is conducted, showing discrepant responses from different wells as a result. Therefore, the AVO attributive analysis technique can be used to identify liquids in carbonate reservoirs. Finally, pre-stack simultaneous inversion technique is used to quantitatively identify fluid types in reservoirs in the research area; The predictions are in turn compared with the results of formation testing, revealing an accuracy of liquid predictions of 83.3%, which manifests that this method provides effective technical support for improving the success rate of drilling and reducing risks of hydrocarbon exploration.

Key words: rock physics modeling, AVO forward modeling, pre-stack inversion, fractured-vuggy reservoir, carbonate rock, Tarim Basin

收稿日期:2017-11-03;修订日期:2018-10-18。

第一作者简介:鲜强(1981—),男,硕士、工程师,碳酸盐岩储层及流体。E-mail:xq2977@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05053-17)。

经过十几年的油气勘探及前人研究,大家逐渐认识到塔里木盆地塔中地区鹰山组碳酸盐岩储层为潜山岩溶型油气藏。但在油气检测方面一直没能得到让人信服的结果,主要有如下几个原因:①塔中地区地表被沙漠覆盖,地震资料信噪比低,难以满足叠前流体预测的需要;②塔中地区储层埋藏深($>6\,000\text{ m}$),储集空间主要为缝、洞等溶蚀体,储层非均质性强;③钻遇缝洞型储层,容易发生放空,难以获得缝洞型储层的纵、横波曲线,利用纵横波曲线进行 AVO 正演,难以确定缝洞型储层中不同流体的 AVO 响应。

针对地震资料信噪比低的问题,采取小面元、高密度地震采集技术及相应的处理技术能很好的解决地震数据的信噪比低和储层成像精度差等问题。当钻遇缝洞型储层容易发生放空与漏失,孔隙度较大($>30\%$),横波预测困难。针对上述问题,前人做了不少研究:杨辉廷^[1]、张广智^[2]等人论证了修正型的 Xu-white 模型^[3],可以用来预测缝洞型储层横波速度,Xu-white 模型对于孔隙型的砂泥岩效果较好,对于碳酸盐岩缝洞型储层横波预测效果一般。杨敏^[4]尝试利用 DEM 模型^[5]进行碳酸盐岩横波预测,预测精度较高。镇晶晶对比了 DEM 模型与 Self-consistent 模型^[6],认为二者假设条件和局限性相似,DEM 模型与包含物加入的顺序有关,Self-consistent 模型只与最后物质形式有关^[7]。本文选择了 Self-consistent 模型进行横波预测,受孔隙大小影响较小,通过调整孔隙结构可以用于孔隙度大于临界孔隙的岩石物理建模。

AVO 正演以及叠前同时反演的理论基础是 Zoeppritz 方程及其在不同假设条件下的简化。1985 年 Shuey 对 Zoeppritz 方程进行了重新推导与简化,将地层泊松比变化与入射角的关系引入简化公式,提出了 Shuey 近似^[8]方程。Shuey 近似方程较为直观地反映了纵波反射系数与入射角及界面两侧介质的弹性参数间的关系。Connolly^[9]提出了弹性波阻抗反演(EI)方法;Whitecombe 等^[10]提出了扩充弹性阻抗反演(EEI)方法,并应用于流体和岩性预测;Li Yongyi 等人^[11]利用 AVO 属性,对加拿大西部盆地的碳酸盐岩进行了叠前油气检测;李宗杰^[12]利用正演模拟实验以及叠前弹性阻抗反演技术成功的预测碳酸盐岩储层的流体性质;唐金良^[13]利用叠前反演技术,针对塔河油田碳酸盐岩进行了叠前油气检测;张远银^[14]利用 AVO 反演预测了塔中地区碳酸盐岩含油气性。

针对上述难题,在前人研究的基础,尝试在塔中地区开展基于岩石物理建模的叠前流体检测。研究对碳酸盐岩岩石物理建模方法进行了探讨,系统的论证

了不同类型储层的 AVO 响应与叠前流体检测的可行性,最终开展了叠前流体检测实验,并对检测结果进行了详细分析与说明。

1 岩石物理建模

岩石物理是沟通储层与地震响应的桥梁。岩石物理建模是建立起储层弹性参数与地震响应之间的关系,通过岩性和流体的替代分析,研究岩性、物性及流体变化对地震响应的影响,来定量地描述油气与地震响应之间的对应关系^[13],从而进行反演的可行性论证及流体敏感参数的优选。岩石物理建模主要包括两个方面:横波预测、流体替代。

1.1 横波预测

横波预测的方法通常是利用经验公式进行预测。Pickett^[15],Castagna^[16]等许多学者给出了不同的纵波-横波速度的关系,上述学者研究基于原生孔隙储层的纵横波关系。而本区碳酸盐岩主要以溶洞、裂缝等次生孔隙为主,利用经验公式进行横波预测存在较大误差。针对本区缝洞型储层对横波预测方法进行了适当地修正。一方面是将尝试用 Self-consistent 模型替换 Xu-white 模型,Self-consistent 模型可以预测孔隙度大于 30% 的储层的横波速度,这对本区洞穴型储层横波预测尤为有利。另一方面是将干岩石骨架由泥岩和砂岩换成泥岩和灰岩,通过 Viogt-Reuss-Hill 平均计算混合矿物的体积模量和剪切模量^[17]。第三,利用 Self-consistent 模型,通过调节矿物的横纵比来实现溶洞和裂缝对碳酸盐岩弹性模量的影响,从而计算出干岩石的弹性模量。第四,利用 Wood 公式^[18],计算在一定压力、温度、矿化度条件下,混合流体的体积模量及密度。最后,利用 Gassmann 方程^[19]计算饱含流体岩石的体积模量 and 对应的纵横波速度。

利用上述方法,计算出的横波速度受流体影响小,预测结果与实测曲线吻合度较高。而纵波受流体及裂缝影响较大,预测的速度与实测的总体趋势背景一致,局部有误差。这种结果表明改进的方法在本区进行横波预测是有效的。

1.2 岩石物性分析及流体替代

流体替代就是替代孔隙中的流体,分析饱含不同流体的对岩石弹性模量的变化引起的纵、横波速度的变化,最终定量分析流体变化引起的地震响应的变化。流体替代的核心是 Gassmann 方程。在前面岩石物理

建模的基础上,确定岩石骨架及流体成分,保持岩石骨架不变,替换孔隙中的流体。

研究区内储层埋深 6 500 m 左右,油气藏的类型为凝析气藏,气油比约 2 000 : 1。目的层地层压力为 60 MPa,地层温度大约为 140 ℃,地层水的矿化度 $80\,000 \times 10^{-6}$ 。本区储层为深埋阶段的碳酸盐岩储层,储层孔隙主要是次生溶孔和裂缝,40 %

的井在钻探过程中发生了放空,孔隙度变化很大(2%~30%,局部可以达到 100%)。储层岩性以灰岩为主,图 1 中非储层密度为 2.71 g/cm^3 ,阻抗为 $17\,300 \text{ g} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当岩石发生溶蚀,洞穴中充注油气后密度及阻抗会迅速下降,图 2 中密度下降到 2.5 g/cm^3 ,阻抗下降到 $12\,000 \text{ g} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。纵波速度(v_p)由 6 359 m/s 下降到 4 700 m/s,下

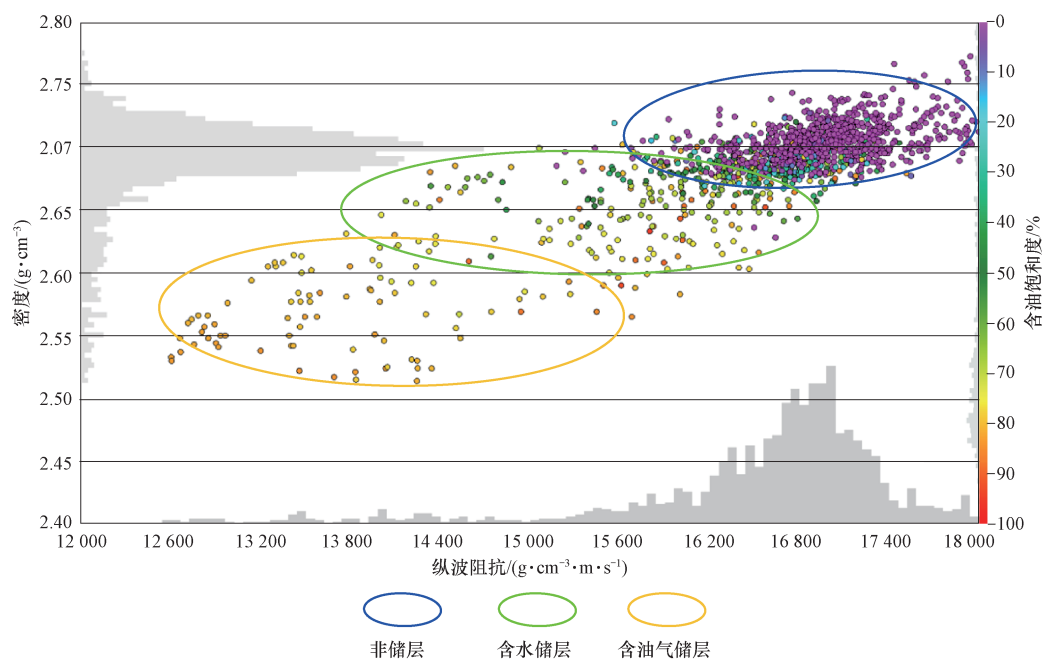


图 1 塔中地区密度与阻抗交汇图

Fig. 1 Cross-plot between density and P-impedance in Tazhong area

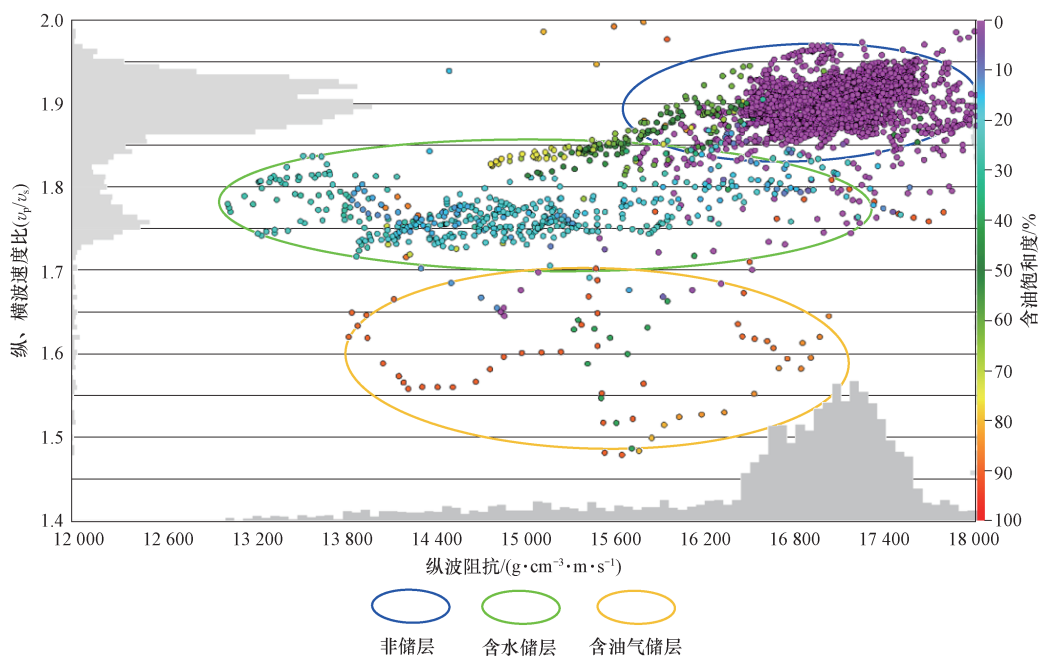


图 2 塔中地区纵横波速度比与阻抗交汇图

Fig. 2 Cross-plot between v_p/v_s and P-impedance in Tazhong area

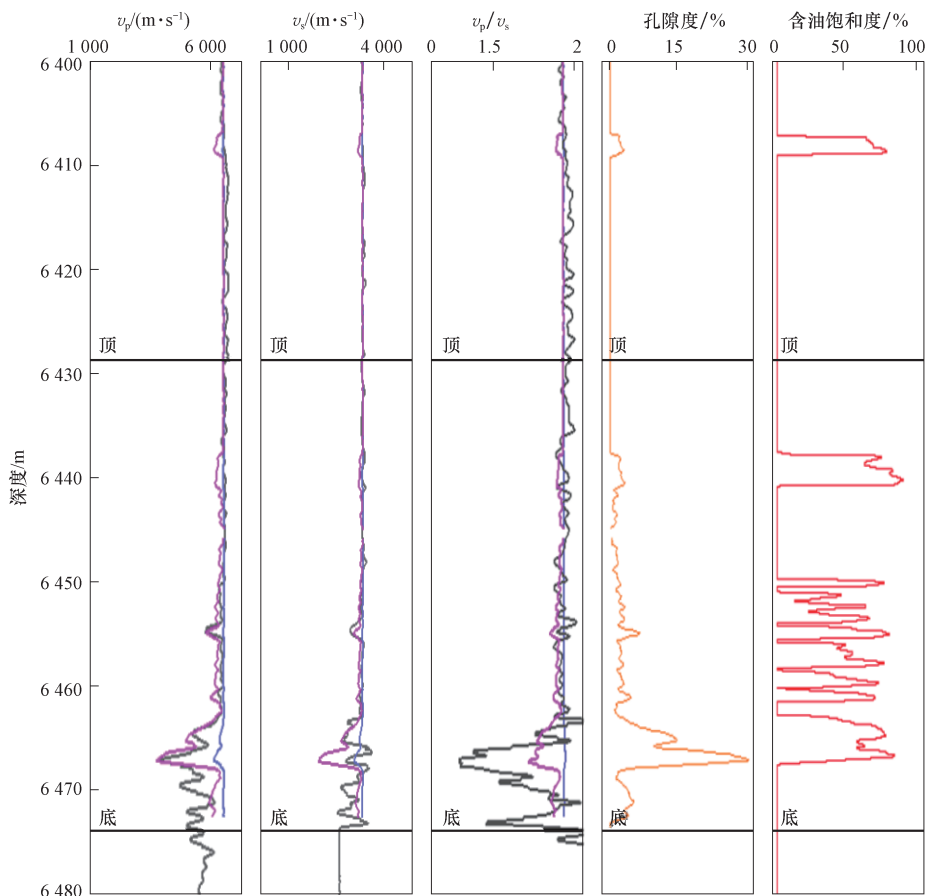


图3 塔中地区某气井流体替代图

Fig. 3 Fluid substitution for gas well in Tazhong area

(图中粉色曲线为混合流体的替代结果,黑色为实测曲线,蓝色曲线为饱含水的预测结果。)

降幅度为 25%。横波速度 (v_s) 由 3 200 m/s 下降到 2 700 m/s,下降幅度为 15%。 v_p/v_s 由 1.91 下降到 1.55,下降幅度为 21%。

在较大的埋深条件下,当孔隙中充满水时,图 3 中纵波速度变化不大;当孔隙中含气时,纵波速度明显下降。不论孔隙中含有何种流体,横波速度整体变化较小。本区流体主要为凝析气,预测流体结果与实测接近。单纯的使用纵波阻抗难以区分储层中的流体,通过前面储层与非储层的交汇以及流体替换试验可知,纵波速度与横波速度的比则可以有效区分油气与水,因此可以选取纵波与横波的速度比作为敏感参数进行流体识别。

2 AVO 理论及正演

AVO 正演从实测纵横波及密度曲线出发,利用 Zoeppritz 方程计算出一个叠前道集。分析这个叠前道集振幅随偏移距变化的关系可以确定 AVO 响应特征。基于流体替代的 AVO 正演,可以定量分析

流体变化对 AVO 响应的影响,最终实现反演的可行性分析。

本文在工区内选择了油井与水井进行 AVO 正演,正演结果显示图 4 中油井的 AVO 响应是振幅随偏移距增大而增大,而图 5 中水井的 AVO 响应是振幅随偏移距增大基本不变或变化不大。不同类型井的截距和梯度是有差异的,可以利用 AVO 特征或其它叠前道集属性在本区开展定性的流体识别研究。

3 叠前同时反演

3.1 道集能量补偿基于观测系统属性

地震数据受观测系统和偏移成像方法的影响,导致 CDP 道集振幅在不同偏移距位置分布不均匀,中偏移距振幅能量强,而小偏移距与大偏移距处能量弱。除了常规的处理流程,在偏移之后还需要进行道集剩余能量补偿。常规的做法是:对道集内振幅进行最大与最小值统计,在道集内部进行能量归一化,这种方法

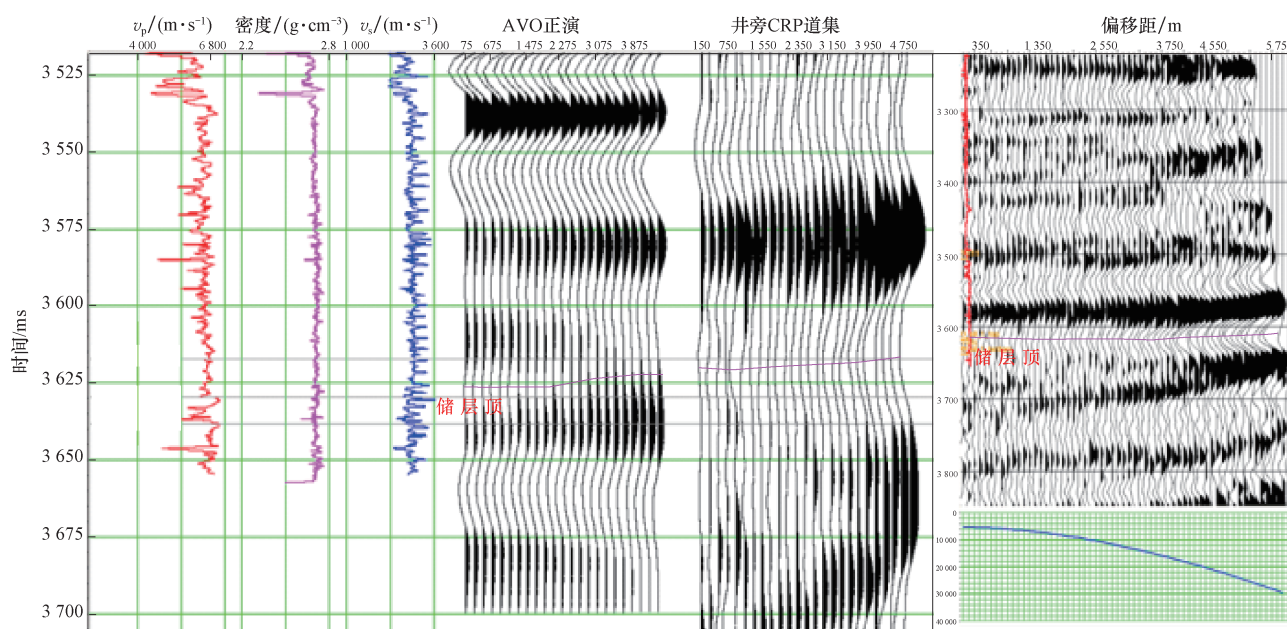


图4 塔中地区油井 AVO 正演

Fig. 4 AVO forward modeling for oil well in Tazhong area

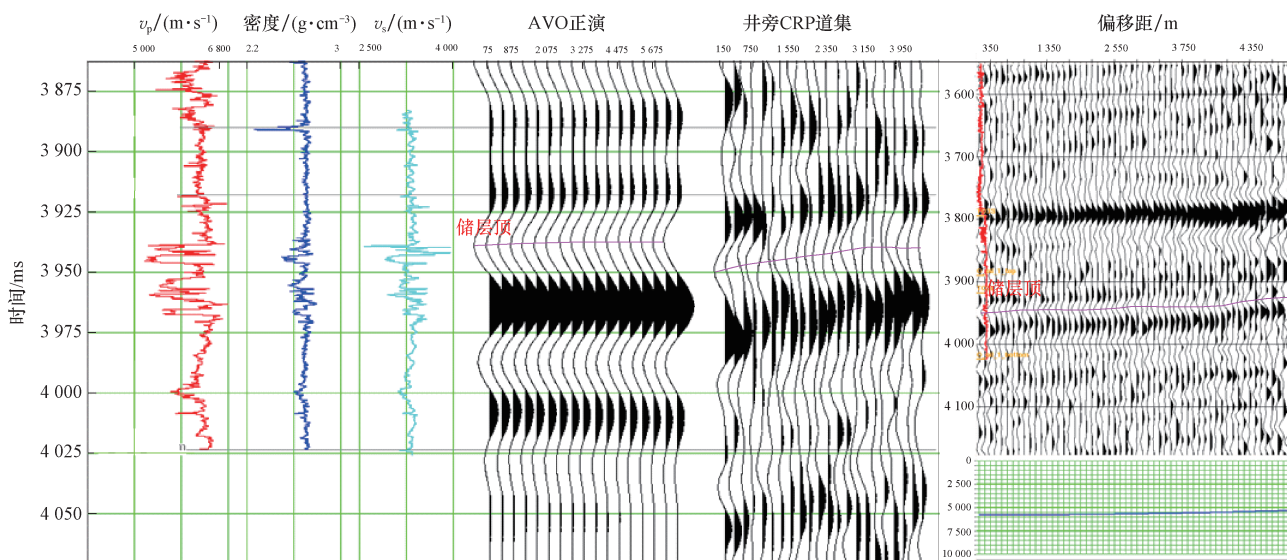


图5 塔中地区水井 AVO 正演

Fig. 5 AVO forward modeling for water well in Tazhong area

一定程度上能消除不同偏移距上的能量异常。

为了使振幅随偏移距的变化关系符合正演模型,本文选择了基于 AVO 正演的道集能量补偿方法。具体做法是对非储层段如本区奥陶系灰岩顶面进行多口井 AVO 正演,然后对 AVO 趋势进行统计,拟合一个振幅随偏移距变化的关系,最终将这个关系应用到工区道集。使得不同类型的井旁道集的振幅变化与井的 AVO 正演道集振幅变化趋势一致。校正前,道集振幅在中偏移距能量强,在近、远偏移距振幅能量弱,见图 6。校正后,道集振幅随偏移距增加而增大,与井旁

(图 4)正演道集的振幅变化趋势一致(图 7)。初步实现了利用井曲线进行 AVO 正演对地震道集数据振幅变化的质控。

3.2 叠前同时反演

地震叠前反演的理论与 AVO 正演及属性分析理论相似,都是 Zoeppritz 方程及其各种类型的简化。本文在前人研究的基础上,以新的岩石物理模型以及高密度地震资料为基础,对塔中地区流体性质进行进一步的探索。

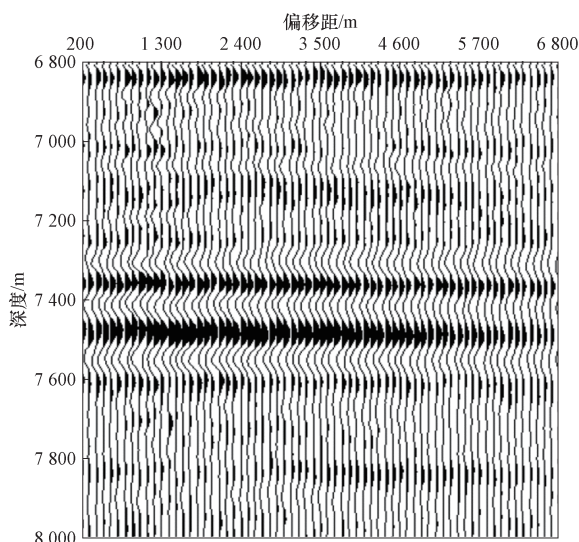


图6 塔中地区常规油井 CRP 道集

Fig. 6 CRP gather for conventional wells in Tazhong area

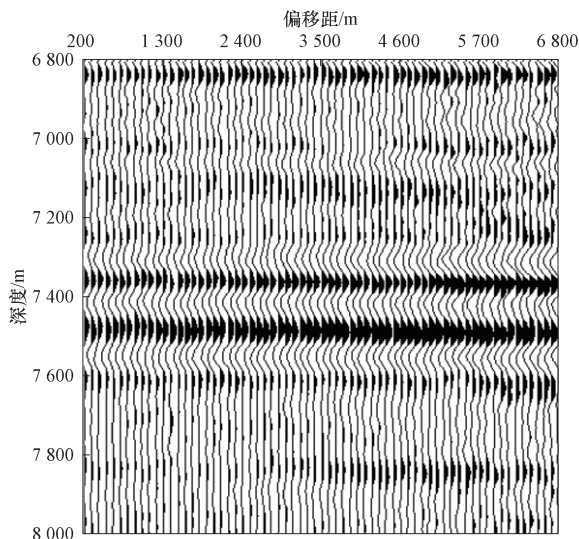


图7 塔中地区油井 CRP 道集校正后

Fig. 7 CRP gather energy compensation for oil wells in Tazhong area

3.2.1 道集部分叠加

AVO 属性分析能够相对快速地、半定量地进行流体检测分析,而叠前同时反演则可以准确地、定量地获得能够反映流体的弹性参数。通过叠前同时反演可以得到纵波横波以及密度等弹性参数,这些弹性参数可以较好的反映由于岩性及物性变化引起的振幅随偏移距的变化,最终预测储层中的流体。

由于本区埋藏较深,AVO 响应都在中远偏移距出现异常。在偏移距 3 000 m 左右出现振幅的变化,在远偏移距的位置容易出现动较拉伸等现象,在近偏移距的位置有多次波及其他类型波的干扰。在选择偏移

距时,适当的去掉远与近偏移距数据,去除干扰的基础上保留 AVO 现象。

针对部分数据体的叠加方法本文主要考虑两点,单个限偏移距叠加数据体的信噪比和反演结果的稳定性。部分叠加数据体越多,反演结果越稳定。在覆盖次数一定的基础上,部分叠加数据体越多,单个数据体的覆盖次数会降低,从而导致单个数据信噪比会下降,最终会影响反演结果的稳定性。本区选取有效偏移距为 1 000 ~ 6 000 m,按照偏移距增量平均将其分为 5 ~ 7 个部分,然后将其叠加生成 5 ~ 7 个部分叠加数据体。为了求解纵、横波速度以及密度等参数,至少需要 3 个部分叠加数据体。利用 5 个部分叠加数据体进行反演能够得到稳定的横波数据,利用 7 个部分叠加数据体进行反演能够得到稳定的横波与密度数据。将本区道集叠加成 7 个和 5 个部分叠加数据体,7 个部分叠加数据体整体信噪比较低,因此使用 5 个部分叠加数据体进行反演。5 个部分叠加剖面整体信噪比较高,对储集体反映能力较好。

3.2.2 多子波标定

利用理论子波制作合成记录,与全叠加数据体进行比较,计算其相关系数,建立初始的时深关系。然后,对每个偏移距叠加数据体分别提取井旁道子波,修正初始的时深关系,子波提取与合成记录标定迭代进行,当标定的相关系数达到最大时,确定最终的时深关系,对应于不同偏移距叠加数据体同一口井的时深关系是唯一的^[20]。

3.2.3 低频模型的建立

由于地震数据的频带是有限的,缺失高频和低频信息。基于约束稀疏脉冲算法的叠前反演能够提高地震数据的带宽,需要利用工区内测井低频信息建立趋势模型进行阻抗和密度的趋势约束,保证反演结果的稳定性。同时测井资料提供了较高的垂向分辨率,较多的保留了测井的高频信息。

3.2.4 叠前同时反演及结果分析

结合偏移速度体,对不同偏移距数据体进行叠前同时反演,通过反演可以得到反映流体的弹性参数。本区储层在充填泥质、油气及水,其地震响应都是串珠状响应(图 8a),在叠后反演剖面上都为低阻抗的响应(图 8b)。常规的叠后反演预测储层能力较好,而反映油气的能力有限。ZG8-H1 井为水井,在叠后反演上为储层响应,在 v_p/v_s 剖面上数值下降较小,由 1.8 下

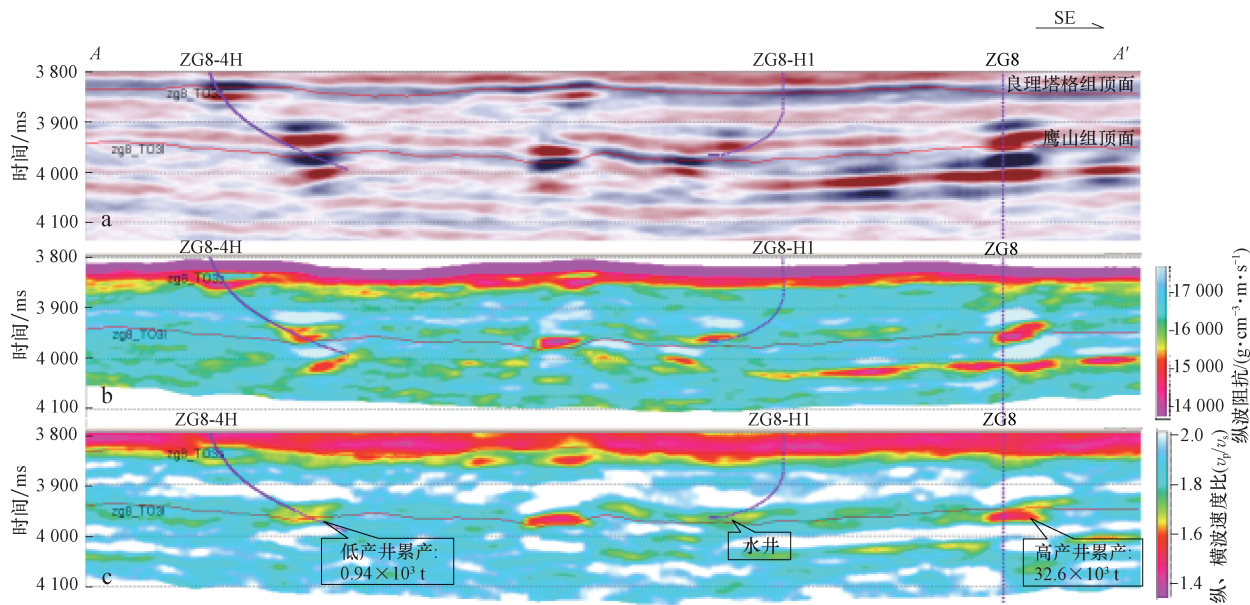


图 8 塔中地区叠前油气预测剖面(剖面位置见图 10)

Fig. 8 Pre-stack hydrocarbon prediction in Tazhong area(see Fig. 10 for profile Cocation)

a. 叠后地震剖面;b. 波阻抗剖面;c. 纵、横波速度比剖面

降到 1.7(图 8c)。ZG8-4 井为低效井(油气累计产量低),在叠后反演剖面上同为储层响应,在 v_p/v_s 剖面上数值下降不明显,由 1.8 下降到 1.65。而 ZG8 井为高

效井(油气累计产量高),含油气后储层的 v_p/v_s 值有明显下降,由 1.8 下降到 1.6 以下。叠前反演得到的纵横波速度比能够有效的识别储层中的流体。

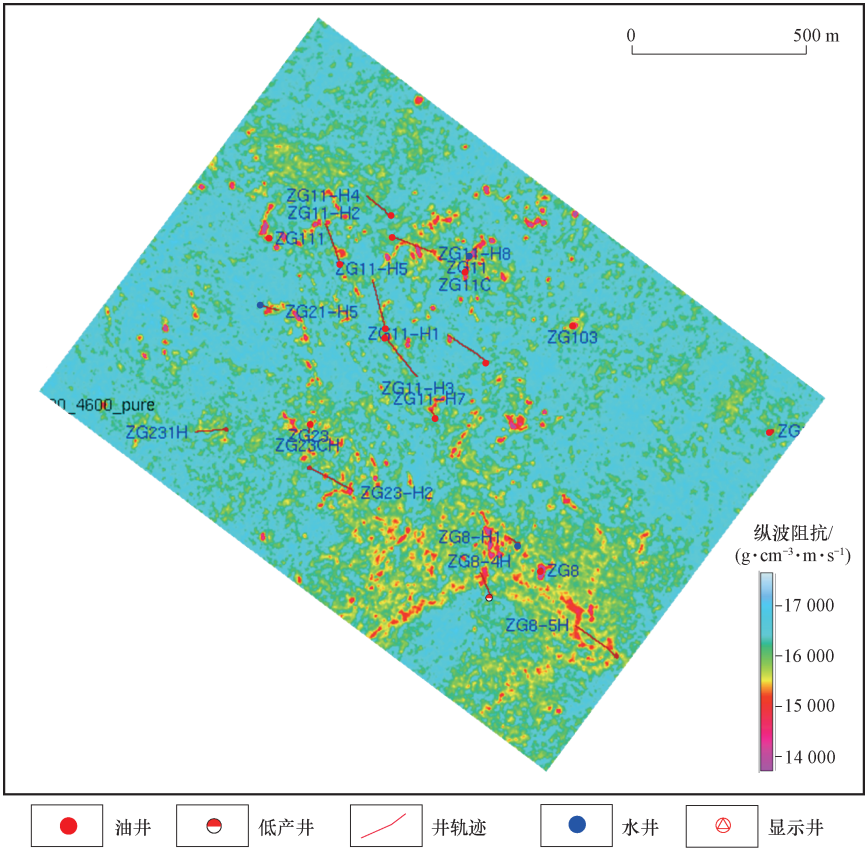


图 9 塔中地区 ZG8 井区鹰山组储层平面预测

Fig. 9 Reservoir prediction of the Yingshan Fm in ZG8 well-block of Tazhong area

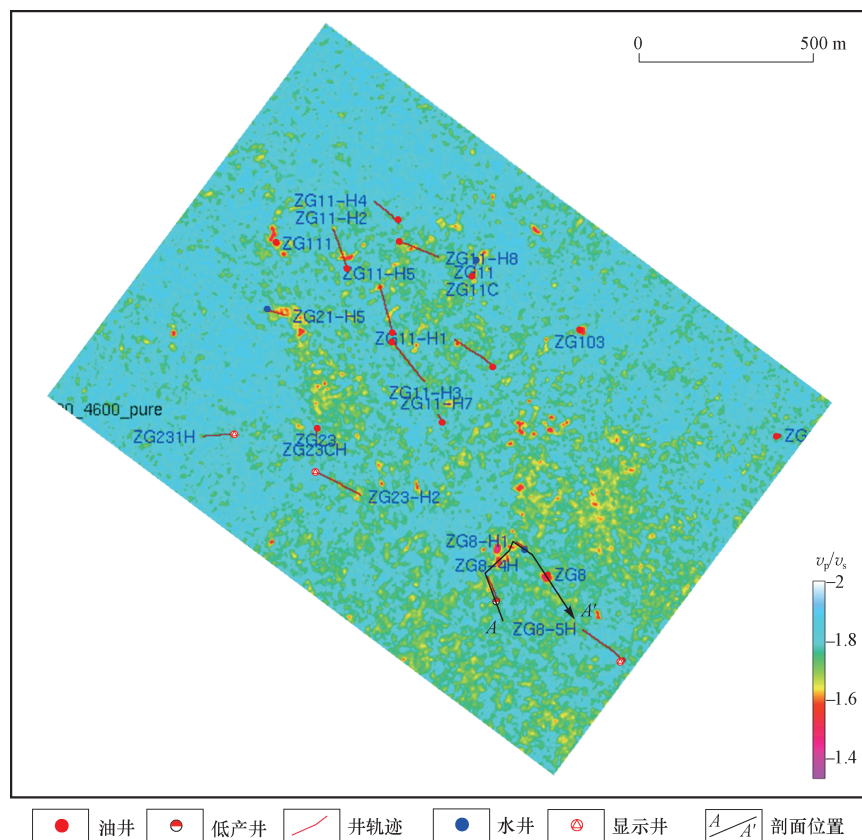


图 10 塔中地区 ZG8 井区鹰山组叠前油气检测平面图

Fig. 10 Hydrocarbon prediction plan for Yingshan Fm in ZG8 well-block of Tazhong area

塔中地区鹰山组储层为早期潜山岩溶和后期断控岩溶共同作用下的产物。塔中地区在鹰山组沉积后,经历了短暂的抬升,在混合水差异溶蚀下^[21],在工区西南部形成了大面积不规则的储层,红色为洞穴型储层(图 9)黄色为孔隙型储层。在工区的北部储集体以洞穴型为主,为后期断裂改造后形成断溶体^[22-23],在平面上呈点状,局部串珠呈线状间接反映断裂发育方向。通过叠前流体检测后,结果显示工区南部潜山型储层区含油较差(图 10)。钻井资料揭示潜山型储层在暴露期泥质充填,储集空间难以保存。工区北部为断控岩溶发育区。由于没有暴露剥蚀,同时储集空间得到了较好的保存,在多期断裂活动的改造下,储集空间得到进一步的扩大,为油气充注提供条件,为有利储层发育区。对本工区的 18 口井进行了预测,15 口井的预测结果与钻探结果一致,吻合率达到 83.3%,利用此结果提供了多个钻探目标。

4 结论

针对缝洞型碳酸盐岩储层的复杂孔隙结构,本文使用 Self-consistent 模型能够较为准确的预测缝洞型

储层的横波速度。通过岩石物理分析及流体替代研究可以优选出反映流体变化的敏感参数,利用纵横波速度比可以有效的进行流体预测。通过 AVO 正演可知,碳酸盐岩缝洞型储层饱含油气时,AVO 的响应为:振幅随偏移距增大而增大;储层含水时,AVO 响应为:振幅随偏移距增大保持不变。对常规 CRP 道集进行振幅能量补偿,消除了观测系统造成的道集能量不均。在 AVO 正演的基础上,对实际的地震道集进行基于 AVO 正演的振幅能量补偿。利用多个分偏移距叠加的地震数据进行叠前同时反演,反演得到的弹性参数 v_p/v_s ,能够有效的反映研究区内流体。

致谢:感谢领导、专家以及同事的建议、指导与帮助。同时感谢中国石油塔里木油田公司对研究提供的资料支持

参 考 文 献

- [1] 杨辉廷,敬兵,陈培元,等. 塔中地区 ZG5-7 井区横波速度的预测[J]. 天然气工业,2012,32(5):25-27.
Yang Huiting, Jing Bing, Chen Peiyuan, et al. Prediction of S-wave velocity in well block ZG5-7, middle Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(5): 25-27.
- [2] 张广智,李呈呈,印兴耀,等. 基于修正 Xu-White 模型的碳酸盐

- 岩横波速度估算方法[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(5): 717–722.
- Zhang Guangzhi, Li Chengcheng, Yin Xingyao, et al. A shear velocity estimation method for carbonate rocks based on the improved Xu-White model[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(5): 717–722.
- [3] Xu S, White R E. A new velocity model for clay-sand mixtures[J]. Geophysical Prospecting, 1995, 43(1): 91–118.
- [4] 杨敏, 李明, 李艳东, 等. 优化岩石物理模型以提高横波速度预测精度[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(7): 74–77.
- Yang Min, Li Ming, Li Yandong, et al. Prediction of shear wave velocity by using optimized rock physical models[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(7): 74–77.
- [5] Mavko G, Mukerje T, Dvorkin J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis in porous media[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 106–132.
- [6] Berryman J G. Mixture theories for rock properties, in a handbook of physical constants[M]. Washington: American Geophysical Union, 1995, 205–228.
- [7] 镇晶晶, 刘洋. 裂缝介质岩石物理模型研究综述[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(5): 1708–1716.
- Zhen Jingjing, Liu Yang. Review over physical model of fractured rock medium[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(5): 1708–1716.
- [8] Shuey R T. A Simplification of the Zoeppritz equation[J]. Geophysics, 1985, (5): 609–614.
- [9] Connolly P. Elastic impedance[J]. The Leading Edge, 1999, 18(4): 438–452.
- [10] Whitecombe D N, Connolly P A, Reagan R L, et al. Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction[J]. Geophysics, 2002, 67(1): 63–67.
- [11] Li Yongyi, Jonathan D. The application of amplitude versus offset in carbonate reservoirs: re-examining the potential[C] // SEG. SEG Technical Program Expanded Abstracts. Calgary: SEG, 1949: 166–169.
- [12] 李宗杰. 正演模拟验证叠前弹性阻抗反演在碳酸盐岩储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2013, 52(3): 323–328.
- Li Zongjie. Application of pre-stack elastic impedance inversion in carbonate reservoirs prediction based on forward modeling[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(3): 323–328.
- [13] 唐金良, 周单, 王世星. 基于叠前反演的缝洞型碳酸盐岩流体检测及评价技术研究[J]. 石油物探, 2013, 52(3): 313–323.
- Tang Jinliang, Zhou Dan, Wang Shixing. Hydrocarbon prediction and evaluation of fracture-vuggy carbonate based on prestack inversion[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(3): 313–323.
- [14] 张远银, 孙赞东, 唐志远, 等. 基于 AVO 反演的溶蚀孔洞型碳酸盐岩储层预测[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(1): 109–113, 120.
- Zhang Yuanyin, Sun Zandong, Tang Zhiyuan, et al. Caved carbonate reservoir prediction based on AVO inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(1): 109–113, 120.
- [15] Pickett G R. Acoustic character logs and their applications in formation evaluation[J]. Journal of Petroleum Technology, 1963, 15(6): 650–667.
- [16] Castagna J P. Shear-wave time-average equation for sand-stones[C] // SEG. SEG Technical program expanded abstract. Washington D. C.: SEG, 1985: 447–448.
- [17] Hill R. A self-consistent mechanics of composite materials[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 1965, 13(4): 213–222.
- [18] Wood A W. A textbook of sound[M]. New York: The MacMillan Co, 1995: 360–363.
- [19] Gassmann F. Elastic waves through a packing of spheres[J]. Geophysics, 1951, 96: 1–23.
- [20] 张广智, 刘洪, 印兴耀. 井旁道精细地震子波提取方法[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(2): 158–162.
- Zhang Guangzhi, Liu Hong, Yin Xingyao. Method for fine picking up seismic wavelet at up-hole trace[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(2): 158–162.
- [21] 张恒, 蔡忠贤, 漆立新, 等. 塔中地区西北部鹰山组成岩早期岩溶作用类型及其特征[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 291–303.
- Zhang Heng, Cai Zhongxian, Qi Lixin, et al. Types and characteristics of eogenetic karst in the Yingshan Formation in northwestern Tazhong area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 291–303.
- [22] 韩长城, 林承焰, 鲁新便, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶斜坡断控岩溶储层特征及形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 644–652.
- Han Changcheng, Lin Chengyan, Lu Xinbian, et al. Characterization and genesis of fault-controlled karst reservoirs in Ordovician carbonate karst slope of Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 644–652.
- [23] 张艳萍, 吕修祥, 于红枫, 等. 塔中隆起两组走滑断裂对岩溶储层发育的控制机制[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 663–673.
- Zhang Yanping, Lyu Xiuxiang, Yu Hongfeng, et al. Controlling mechanism of two strike-slip fault groups on the development of the Ordovician karst reservoirs in the Tazhong Uplift, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 663–673.

(编辑 张亚雄)