

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

常少英¹, 李世银², 乔占峰¹, 林正良³, 赵昭阳⁴

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油塔里木油田分公司;

3 中国石化南京物探研究院; 4 中国石油大学地球科学学院

摘要 塔里木盆地 TZ62 井区奥陶系碳酸盐岩风化壳岩溶地层与上覆桑塔木组泥岩地层存在较大的波阻抗差, 致使风化壳下部呈现弱反射特征的裂缝孔洞型储层被地层界面的强反射所遮挡, 造成常规振幅对该类储层的预测能力差。通过构建地层框架模型、地层框架镶嵌储层模型、去除岩性顶界面后的镶嵌储层模型等 3 种情况的地质模型, 对不同地层结构类型、不同发育位置的储层进行正演模拟, 采用基于波形分解的岩溶储层预测技术, 将正演地震数据分解成若干分量, 每一分量反映具有相似物性的地层, 进而通过对目标分量的提取, 达到预测弱振幅储层的效果。将基于波形分解的岩溶储层弱振幅提取技术应用于 TZ62 工区实际资料, 依据油田实际生产数据的分析, 验证了该技术应用的有效性, 解决了弱振幅孔洞型储层难以预测的问题。

关键词 风化壳; 碳酸盐岩; 岩溶储层; 波形分解; 储层预测; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.2⁺4

文献标识码: A

0 前言

塔里木盆地 TZ62 井区奥陶系碳酸盐岩潜山岩溶地层埋深一般超过 5 500 m, 属于深层油藏, 储集空间主要为规模较大的溶洞以及缝洞, 在致密石灰岩地层中呈强非均质性分布特征, 在地震剖面上呈现强串珠状反射特征, 在平面上呈点状分布。长期以来这套地层是塔里木盆地碳酸盐岩发育区的主要勘探目标^[1-2]。但随着近年勘探开发的深入, 在一些开发成熟区, 呈现强串珠状地震反射特征的储层已经钻探殆尽, 因此迫切需要寻找新类型的钻探目标。研究发现, 在奥陶系风化壳的下部发育储集空间以裂缝、溶蚀孔洞为主的储层, 因为这类储层与非储层的波阻抗差异小, 所以它总体呈弱地震反射特征, 并且由于风化壳岩溶界面的强反射特征, 掩盖了这类储层的弱振幅响应特征, 因此这类储层具有较强的隐蔽性。如何提取出这

类弱振幅响应特征的储层信息是实现增储上产亟需解决的问题。

目前解决这个问题主要的手段有 2 种, 一种是采用“三宽一高”采集技术对储层发育区重新进行数据采集^[3-4], 以期充分利用地震数据信息的密集性, 寻找新的储层; 另一种方法是在原有炮集数据体上对储层发育目标区进行地震资料处理方法的改进^[5-6], 以寻找弱振幅信息, 但这 2 种方法存在成本相对较高、研究周期长、多解性强的缺陷。本文采用基于波形分解的储层弱振幅提取技术: 首先, 需要经过地震子波分解, 把一个地震道分解为不同形状(主频)、不同振幅子波的集合; 然后, 通过地震子波重构, 针对不同的解释目标, 选取最能表达该目标变化和分布的子波, 保持它们分解后的位置不变, 重新叠加从而形成一个新的地震道, 新合成的地震道集将最大限度地反映该目标的变化。对于预测被强反射振幅屏蔽的弱振幅储层

收稿日期: 2018-02-03; 改回日期: 2019-01-04

本文受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”下属课题“岩相、白云石化、先存孔隙对碳酸盐岩规模储层形成与保护机制研究”(编号: 2016ZX05004-002)和中国石油集团重大专项“深层油气勘探开发关键技术研究”下属课题“深层规模优质储层成因与有利储集层评价”(编号: 2014E-32-02)联合资助

第一作者: 常少英, 高级工程师, 主要从事地质-地球物理综合研究工作。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

的问题,则是通过去除岩性、地层结构的地震反射特征的影响,以凸显弱振幅储层特征来解决,这为识别同一时段地震数据体内,不同等级、不同地震响应的地质岩性、岩相和地层结构类型的综合特征提供了有效方法^[7-13]。该方法在TZ62井区得到较好的应用,指明了新发现储层的分布位置,新发现储量 $80.5 \times 10^4 \text{t}$,为新一轮的井位部署提供了技术支持。

1 研究区概况

塔里木盆地奥陶系良里塔格组礁滩储集体位于塔中I号断裂带的东部,整体呈北西-南东方向展布。研究目的层良里塔格组,属于镶边台地,地层由下部泥灰岩段、中部颗粒灰岩段和上部泥灰岩段组成。良里塔格组上覆地层为桑塔木组泥岩。塔中地区钻达良里塔格组的探井已有20多口,其中有10口井钻遇台缘礁滩体。从取心段来看,塔中礁滩体实际上是层状生物礁和颗粒滩的复合体,储层主要受岩溶作用控制,其中规模较大的缝洞体得到较充分钻探,储层尺度小、连通性好的裂缝-孔洞型弱地震振幅储层是下一步重要的勘探开发目标。研究区TZ62井区地震工区面积 420 km^2 ,地震主频30 Hz。

2 储层弱振幅提取技术原理

通常而言,地震记录上看到的某个地震反射同相轴,其实它并不是简单来自某个界面的一个反射波,而是来自一组靠得很近的多个界面的许多地震反射子波叠加的结果。因此,地震记录上的一个反射波组通常并不严格对应于地质意义上的一个地层分界面。但在一组靠得很近的界面中,往往都会存在一个主界面,该主界面的两侧波阻抗差异最大、反射波能量最强,它对地震波的能量、波形就起到主要的控制作用。也就是说,如果主界面附近的薄层和围岩的波阻抗差异小、反射波能量弱^[14],并且远远低于主界面产生的强反射能量,那么这组界面的反射波叠加在一起后,薄层的弱反射就被掩盖,强反射对弱反射形成了强烈屏蔽作用。在这种情况下提取的地震属性,主要也是反映主界面的特征,其他界面的信息往往被掩盖,从而难以进行有效的识别。

针对强反射屏蔽下的储层弱振幅提取问题,本文采用多子波分解技术,即通过对某个主频子波的

分解以消除屏蔽作用,并突出弱信号特征的方式处理。多子波分解技术的思路是在时间域把地震道分解成不同形态子波的叠加^[14]。该方法在实际应用中的地震道分解和重构过程为: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主频和能量的雷克子波;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某些不必要的主频的雷克子波,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。

对于给定时间段地震数据 S_i ,可以定义为:

$$S_i = \begin{bmatrix} S_{i1} \\ S_{i2} \\ \vdots \\ S_{iN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 S_{ij} 为该段地震数据的样点振幅值, N 为样点数。对于给定的地震数据体 S 则可以表述为:

$$S_i = [S_1, S_2, \dots, S_p, \dots, S_M] \quad (2)$$

式中 M 为地震数据段的个数。对数据体 S 进行分解计算,得到 N 个基本形状向量

$$V_k = \begin{bmatrix} v_{1k} \\ v_{2k} \\ \vdots \\ v_{Nk} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $k=1,2,3,\dots,N$ 。每一个给定地震数据段 S_i 可以精确地表述为:

$$S_i = a_{i1}V_1 + a_{i2}V_2 + \dots + a_{iN}V_N$$

$$\text{即 } S_i = a_{i1} \begin{bmatrix} v_{11} \\ v_{21} \\ \vdots \\ v_{N1} \end{bmatrix} + a_{i2} \begin{bmatrix} v_{12} \\ v_{22} \\ \vdots \\ v_{N2} \end{bmatrix} + \dots + a_{iN} \begin{bmatrix} v_{1N} \\ v_{2N} \\ \vdots \\ v_{NN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

这里 a_{ik} ($k=1,2,3,\dots,N$)为地震数据段 S_i 的第 k 分量的振幅。 $a_{ik}V_k$ 是 S_i 的第 k 个分量。至此,地震数据段(道)便被分解成 N 个不同形状的波形分量的线性叠加。

基于多子波分解数据体的波形分解是一种提取线性相似地震波形状的分解与合成的方法,这一方法把输入的某一时窗内的地震数据段分解成若干分量。每一分量反映具有相似物性的地层,而

通常情况下,具有相似物性的地层具有相似的岩性、岩相和地层结构的特征。在所有的分量中,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,第2分量则是去掉第1分量后的地震数据段中具有最大共性、最大能量的波形,第3分量则是去掉第1和第2分量后的地震数据段中具有最大共性、最大能量的波形,依此类推。因此,第1分量反映了该地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;第2分量则反映该地区次一级的沉积亚相在岩性、岩相和地层结构类型上的综合特征,其相应的振幅属性反映这种综合特征在该区的分布形态,依此类推。

地震数据体分解技术为我们提供了一个识别同一时段的地震数据体内,不同等级、不同地震响应的地质岩性、岩相和地层结构类型的综合特征的有效方法。需要注意的是,波形分解的输入数据可以是全子波重构地震数据体(相当于原始地震数据体),也可以是部分子波重构数据体。数据体不同,分解后的分量所代表的地质意义就不同。如果用全子波重构数据体作为输入,波形分解之后的第1分量就代表所研究目的地层占主导作用的地层在

岩性、岩相和地层结构类型上的特征总和,因为该数据体包含所有的地层信息和噪音。第2分量为去掉第1分量所代表的地质特征之后的、占最大共性的地层在岩性、岩相和地层结构类型的特征总和,依此类推。那么,如果一个研究区发育规模不大的生物礁相沉积,而研究区的大部分地层为石灰岩或泥岩,那么该石灰岩或泥岩的综合特征为波形分解的第1分量所反映,而作为储层的生物礁相因为分布规模较小,则其综合特征可能为第2或第3分量所反映。

3 储层弱振幅提取技术正演模拟

研究区奥陶系良里塔格组石灰岩地层顶部沿不整合面发育岩溶储层,上覆地层是桑塔木组泥岩,下伏地层是鹰山组石灰岩。为了验证波形分解技术的有效性,依据研究区地层特征,设计正演模型(图1),其岩石物理参数见表1。

表1 塔里木盆地TZ62井区正演模型参数表

地层	速度/(m.s ⁻¹)	密度/(g.cm ⁻³)
桑塔木组	4 250	2.40
良里塔格组	6 210	2.61
鹰山组	6 300	2.63
孔洞型储层	4 080	2.20

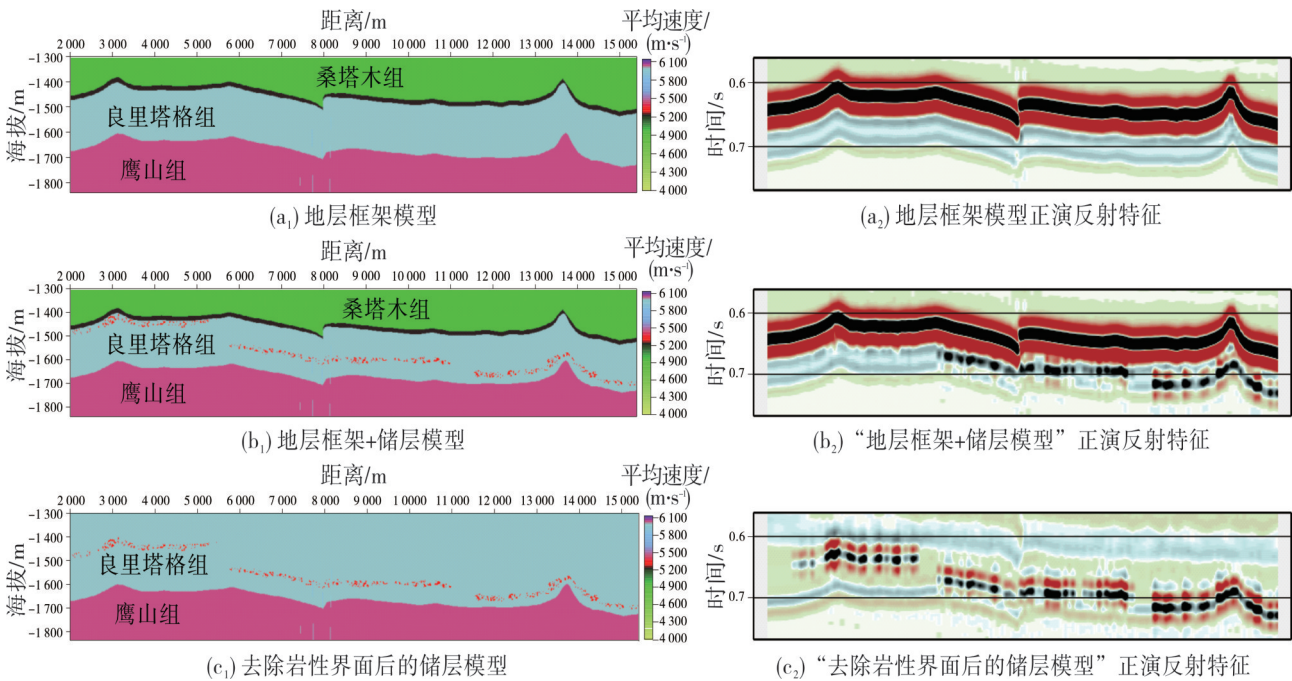


图1 塔里木盆地TZ62井区潜山岩溶储层发育模型及正演反射特征对比

设计的正演地质模型包括3种情况。模型1(图1a₁)为地层框架模型,地层包括桑塔木组、良里塔格组和鹰山组,它们的地震响应特征为:良里塔格组储层由于岩溶顶界强反射的存在,表现为“大强轴”反射特征(图1a₂)。模型2(图1b₁)为地层框架镶嵌孔洞型储层模型,其地震响应(图1b₂)呈现以下2个方面的特征:靠近岩溶界面的储层表现为弱振幅反射特征;而远离岩溶界面的储层表现为强振幅反射特征。模型3(图1c₁)为去除岩溶界面只保留孔洞型储层及下伏鹰山组地层的模型,其地震反射特征是靠近岩溶界面和远离岩溶界面的储层均表现为清晰的“一峰两谷”强振幅反射特征(图1c₂)。

利用地层框架及储层模型正演得到的地震正演

数据,采用波形分解技术,获得第1分量、第2分量、第3分量、第4分量以及大于第4分量的数据(图2a—2f),发现第1分量特征和地层框架模型地震响应特征一致(图2a,2b)。同时,将第1分量去除后,剩余所有分量的叠加剖面 and 去除岩性界面后储层地震响应特征剖面是一致的(图2g,2h)。因此,通过以上正演模型分析,可以认识到强反射波的波形比较一致,而且能量强,分布广;而反射波较弱的储层和其他地层的信息,由于能量弱,分布范围小,常常叠加于强反射之上,被强反射所掩盖。因此在波形分解的结果中,第1分量的波形将自然地与强反射的波形一致。在去掉第1分量之后,叠加于强反射之上的储层以及其他较弱的地层信息则很自然地揭示出来^[15-16]。

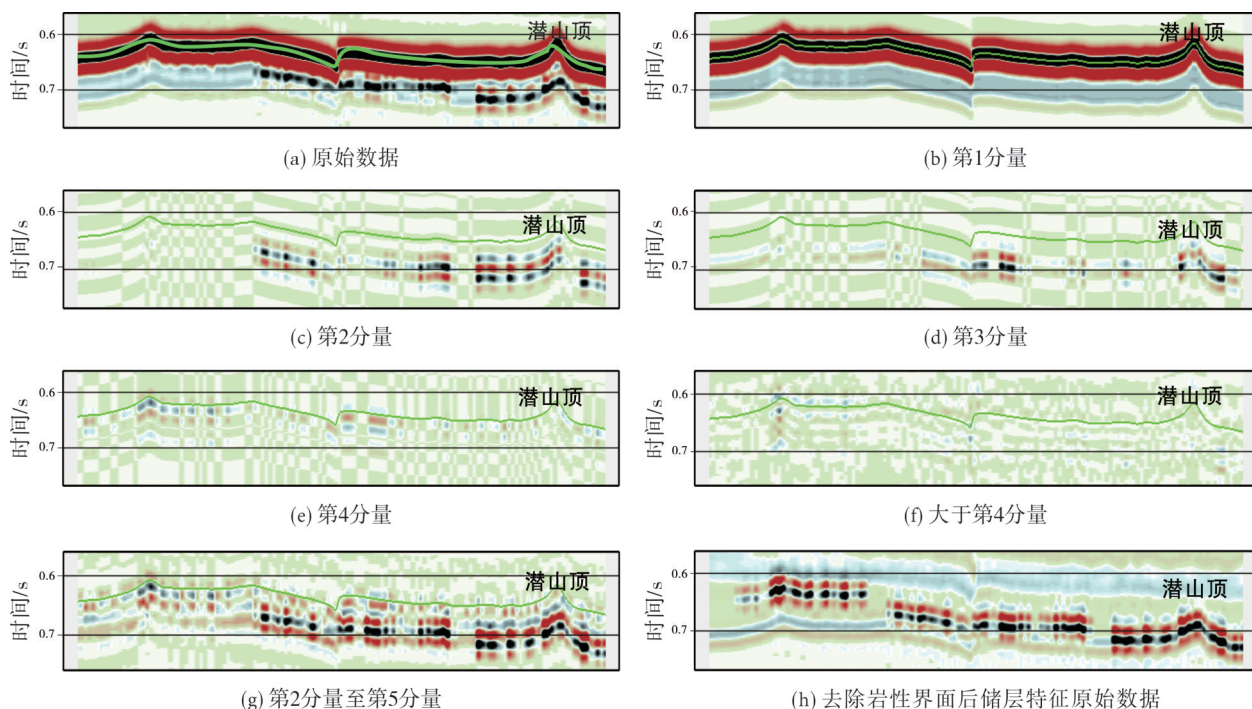


图2 塔里木盆地TZ62井区潜山岩溶储层地震正演数据波形分解剖面对比

4 应用效果分析

塔里木盆地塔中地区奥陶系分为上奥陶统(桑塔木组)及中奥陶统(良里塔格组、一间房组、鹰山组),前者为碎屑岩沉积,后者为碳酸盐岩沉积。由于中奥陶统致密碳酸盐岩(平均速度为6 000 m/s)与上奥陶统碎屑岩(平均速度为4 950 m/s)存在较大的波阻抗差异,因此在地震剖面上形成了“两谷夹一峰”的连续强反射界面。前人多关注于中奥陶统台地边缘强振幅岩溶礁滩储层的勘探开发,而中

奥陶统内幕储层的储集空间以裂缝、溶蚀孔洞为主,储层与非储层的波阻抗差异小,总体呈弱反射特征,因此,地层界面屏蔽了下伏地层尤其是良里塔格组内幕缝洞型储层的地震响应,以致难以预测良里塔格组呈弱地震振幅反射特征的缝洞型储层及其分布。

以TZA井为例进行单井储集单元解剖:原始地震剖面(图3a)有①号和②号两个缝洞体,通过波形分解技术的应用后,在地震剖面上(图3b)发现③号储层。为了进一步验证预测的准确性,分析了已知

井的生产累积产量与累积压降数据的关系(图4)。发现累积产量和累积压降交会曲线有3个阶梯,说明这3个缝洞体相互连通,这与地震储层预测结果十分吻合,也说明了该技术方法的有效性。

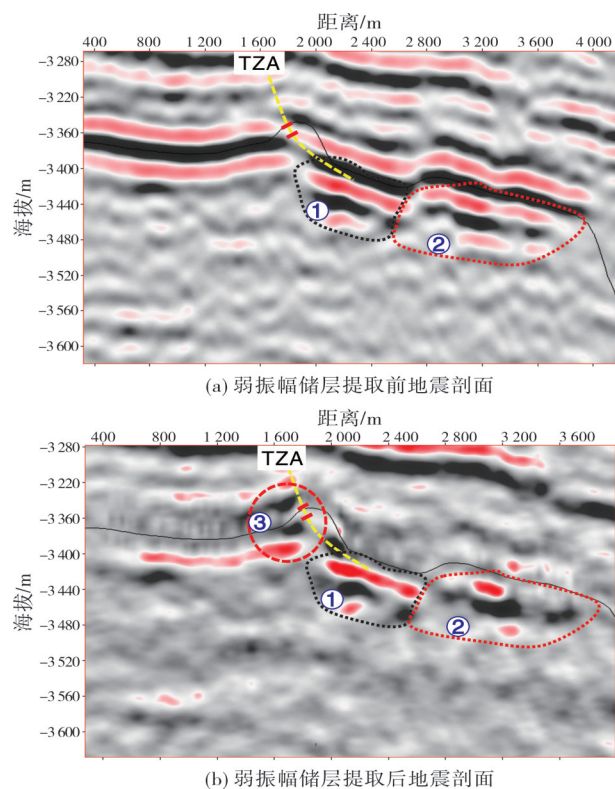


图3 塔里木盆地TZ62井区过TZA井储层弱振幅提取前后剖面对比

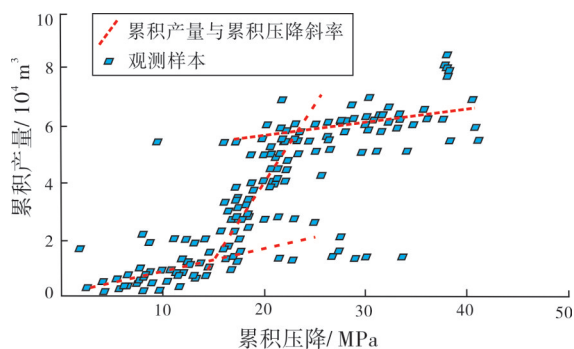


图4 塔里木盆地TZA井的累积产量与累积压降交会图

对TZ62井区12口井的被不整合面强反射轴压制的相对弱振幅溶洞储层识别结果进行统计,共有10口井钻遇岩溶洞穴型储层,溶洞钻遇率为83%。钻遇弱反射特征储层的井,对应的是高度在1.5 m以下、以漏失为主的小规模溶洞,这证实了该项技术的实用性和可靠性。将该技术在整个

TZ62井区推广(图5),支撑新增储量 80.5×10^4 t。该成果为研究区新一轮的井位部署提供了有力的技术保障。

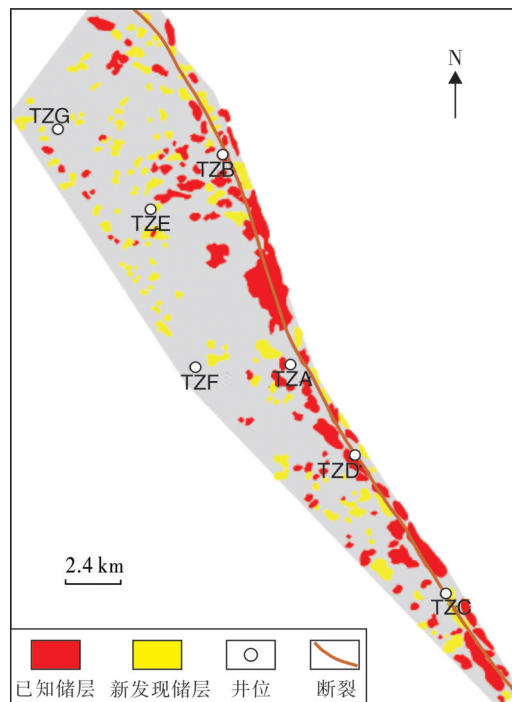


图5 塔里木盆地TZ62井区岩溶储层预测图

5 结论

通过对碳酸盐岩的岩溶储层弱振幅提取技术的研究,形成了以下3个方面的认识:

(1)正演模拟结果表明,在塔里木盆地塔中TZ62井区风化壳连续强反射界面之下的良里塔格组,靠近岩溶界面的储层表现为弱振幅反射特征,而远离岩溶界面的储层表现为强振幅反射特征;去除岩溶界面只保留孔洞型储层及下伏鹰山组的模型中,靠近岩溶界面和远离岩溶界面的储层均表现为清晰的“一峰两谷”强振幅反射特征。

(2)多子波分解数据体的波形分解技术的应用效果表明,第2分量至第5分量叠加地震数据体有效地去除了风化壳界面的影响,使掩盖在风化壳之下的良里塔格组裂缝-孔洞型弱振幅储层的“一峰两谷”地震响应特征被突显。

(3)将基于波形分解的岩溶储层弱振幅提取技术应用于TZ62工区实际资料,并通过实际生产数据的验证,证实了该项技术的有效性,解决了风化壳强反射屏蔽弱振幅导致储层预测难的问题。

参考文献

- [1] 焦存礼,何碧竹,邢秀娟,等.塔中地区奥陶系加里东中期 I 幕古岩溶特征及控制因素研究[J].中国石油勘探,2010,15(1): 21-26.
- [2] 马丽娟,孔庆莹,刘坤岩,等.塔河油田奥陶系油藏弱振幅反射特征及形成机理[J].石油地球物理勘探,2014,49(2): 338-343.
- [3] 杜金虎,赵邦六,王喜双,等.中国石油物探技术攻关成效及成功做法[J].中国石油勘探,2011,16(5/6): 1-7.
- [4] 何海清,李建忠.中国石油“十一五”以来油气勘探成果、地质新认识与技术进展[J].中国石油勘探,2014,19(6): 1-13.
- [5] 吕小伟,钮学民.几项关键处理技术的保幅性分析及应用[J].中国石油勘探,2012,17(2): 44-49.
- [6] 周荔青,刘忠群,蒲仁海,等.镇泾地区长 8 段三维地震强振幅异常带成因探讨[J].石油地球物理勘探,2017,52(2): 371-380.
- [7] 魏小强,雷秀丽,马庆珍.基于多道奇异谱分析的三维地震数据规则化方法[J].石油地球物理勘探,2014,49(5): 846-851.
- [8] 桑雨,高树生,宋宏文,等.利用奇异值分解方法提高地震数据信噪比[J].石油地球物理勘探,2014,49(增刊1): 72-75.
- [9] 黄捍东,王彦超,郭飞,等.基于佐普里兹方程的高精度叠前反演方法[J].石油地球物理勘探,2013,48(5): 740-749.
- [10] 周亚同,王丽莉,蒲青山.压缩感知框架下基于 K-奇异值分解字典学习的地震数据重建[J].石油地球物理勘探,2014,49(4): 652-660.
- [11] 鲁玲,许威.块 Hankel 矩阵快速低秩估计及在地震信号中的应用[J].同济大学学报(自然科学版),2014,42(5): 807-815.
- [12] 程杰,郭波,郑建雄,等.子波分解技术在南贝尔凹陷北洼槽储层预测中的应用[J].石油地球物理勘探,2011,46(增刊1): 76-79.
- [13] 尚久靖,李国蓉,吕艳萍,等.塔河盐下地区孔洞类储层特征与成因分析[J].中国石油勘探,2011,16(2): 18-23.
- [14] 代双和,陈志刚,于京波,等.多子波分解与重构技术在阿尔及利亚 TKT-NGS 油田储层描述中的应用[J].石油地球物理勘探,2011,46(1): 103-109.
- [15] 王亚,秦凤启,王孟华,等.华北油田强振幅高连续地震反射多解性分析及技术对策[J].中国石油勘探,2013,18(3): 34-39.
- [16] 王彦仓,秦凤启,杜维良,等.地震属性优选、融合探讨[J].中国石油勘探,2013,18(6): 69-73.

编辑:黄革萍

Application of weak amplitude reservoir identification technology in karst reservoir of carbonate weathered crust: an example study of TZ62 well area in Tarim Basin

CHANG Shaoying, LI Shiyin, QIAO Zhanfeng, LIN Zhengliang, ZHAO Zhaoyang

Abstract: There is a large difference in wave impedance between the Ordovician carbonate karst stratum and the mudstone of the Sandamu Formation in the TZ62 well area of Tarim Basin. As a result, the fractured and porous reservoirs with weak amplitude reflection which developed in the lower part of the weathered crust are blocked by the strong reflection of the lithologic interface, and it is difficult to predict this type of reservoirs by conventional amplitude. Through building three types of geological model, including stratigraphic framework model, the stratigraphic framework mosaicing reservoir model and the mosaicing reservoirs model after removing the lithologic top interface, the reservoirs with different types of stratigraphic structure and different locations are simulated by forward modeling. The forward seismic data are decomposed into several components by using the karst reservoir prediction technology based on waveform decomposition, and each component reflects the strata with similar physical properties, then the weak amplitude reservoir can be predicted by extracting the target component. The effectiveness of this technology is verified by applying in TZ62 well area of Tarim Basin and by analyzing the actual production data of oilfield.

Key words: weathered crust; carbonate; karst reservoir; waveform decomposition; reservoir prediction; Tarim Basin

CHANG Shaoying, First author: Senior Engineer, engaged in the comprehensive research of geology and geophysics.

Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China