

塔河油田奥陶系油藏弱振幅反射特征及形成机理

马丽娟*^① 孔庆莹^② 刘坤岩^② 司朝年^② 王英^②

(^①中石化地球物理公司,北京 100120; ^②中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

马丽娟,孔庆莹,刘坤岩,司朝年,王英. 塔河油田奥陶系油藏弱振幅反射特征及形成机理. 石油地球物理勘探, 2014, 49(2): 338-343.

摘要 在塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞储层勘探开发中,从具有弱振幅反射特征的地层中寻找有利的富含油气部位已成为现阶段的新趋势。本文从地震弱反射入手,依据反射特征将弱反射划分为弱串珠、宽波谷、内幕弱和杂乱等四种典型的弱反射类型;结合钻井、测井及地震资料,研究了这四类弱反射的储层特征,建立地质模型,利用正演模拟进一步探讨了弱反射的形成机理,认为储层厚度和空间延展关系是造成不同弱反射类型的根本原因。

关键词 弱反射 碳酸盐岩 奥陶系 正演模拟 储层描述

中图分类号:P631 **文献标识码**:A

1 引言

在2006~2010年间,塔河油田奥陶系地层的主要勘探开发对象是以“串珠、强地震反射”、中上部溶洞为主的规模缝洞体。勘探实践结果表明“串珠状”储层具有较好的产能。随着大多数具有“串珠状”反射特征的大缝大洞储层已投入开发,近年来的勘探对象逐步转向为以“小串珠、弱反射”、中深部缝洞体为主要特征的储集体(层段)^[1]。对于缝洞型储层中“串珠状”反射的成因,已有较深入的研究和认识^[2~4],但对串珠之外的“弱反射”的形成机理及其对应的储层类型的研究尚且缺乏^[5]。塔河油田奥陶系缝洞型油藏未动用储量中87%位于弱反射区或者无明显反射特征的“蓝色海洋区”^[6]。目前已钻遇弱反射特征区油井的产能差异较大,严重影响了塔河油田的勘探开发部署,因此加强对弱振幅反射特征区的研究意义重大。

2 弱反射定义及分类

根据成像测井、综合录井资料初步划定储层段,通过井震标定确定储层发育段对应的地震剖面的时

窗范围是中下奥陶系顶界面(T74)以下0~60ms(相当于T74层以下0~180m)。

根据不同工区研究时窗内振幅值大小,在排除强串珠反射的基础上,依据地震波形特征及地震属性特征,可将地震弱反射分为弱串珠、宽波谷、内幕弱以及杂乱弱反射^[5]等四种类型。

(1)弱串珠反射 弱串珠地震反射表现为2~3个连续中等振幅波峰和波谷的叠置,剖面上呈“羊肉串”状,其振幅值为强串珠的40%~50%(图1a)。

(2)宽波谷反射 宽波谷地震反射的特征是在剖面中T74界面下的第一个波谷较“胖”,即频率低,其弧长、振幅属性值大(图1b)。

(3)内幕弱(空白)反射 内幕弱(空白)地震反射的特征表现为剖面中T74波峰下的空白反射带,其弧长、振幅属性值最小(图1c)。

(4)杂乱反射 杂乱地震反射的特征表现为剖面中T74及其下地震同相轴不连续,扭动或错断(图1d)。杂乱反射相邻道间相关性差,同相轴变化快。

3 “弱反射”缝洞型储层特征

塔河油田奥陶系灰岩基质岩性致密,基质储集

*北京市朝阳区惠新东街甲6号中国石化地球物理公司,100120。Email: malj.osgc@sinopec.com

本文于2013年3月27日收到,最终修改稿于2014年2月27日收到。

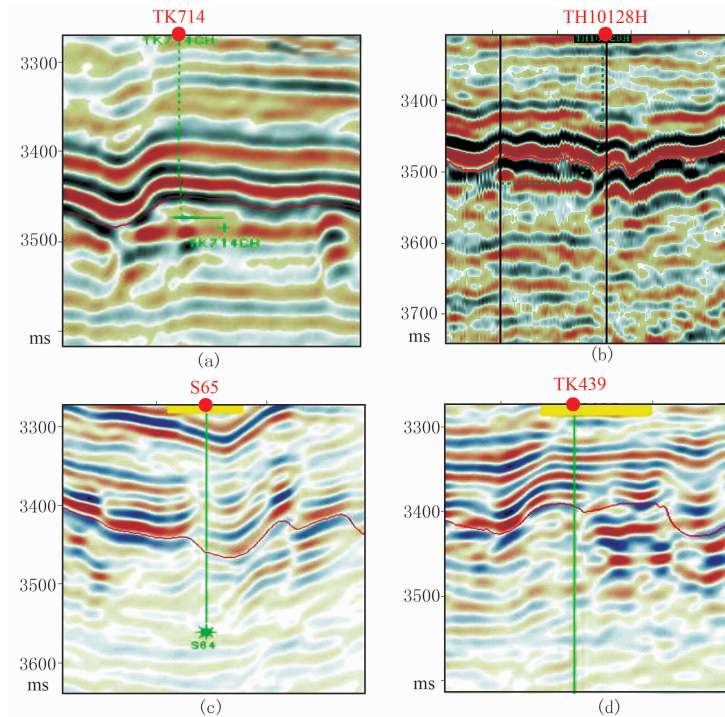


图 1 塔河油田中下奥陶统顶界面以下四种典型的弱反射类型
(a)弱串珠状反射;(b)宽波谷反射;(c)内幕弱(空白)反射;(d)杂乱反射

空间以晶间孔(重结晶、白云化)为主,但普遍欠发育,仅在局部零星可见,对储集性能贡献不大;灰岩层储集空间主要为岩溶形成的溶蚀孔、洞和裂缝^[7]。根据该区储层储集空间类型及其组合方式,可将其划分为两类:Ⅰ类储集体包括裂缝—孔洞型、裂缝—溶洞型;Ⅱ类储集体以裂缝为主。不同的弱反射特征反映其储层发育特征的不同。塔河油田目的层段的三种孔隙度测井曲线(密度、声波、中子)的总体特征是变化小、基本呈直线。其中Ⅰ类储层测井曲线表现为低密度、高时差、高中子特

征,Ⅱ类储层测井曲线表现为相对高密度、低时差、低中子特征。

3.1 溶洞的发育特征

参照文献[8]提供的溶洞识别标准(表 1),对 129 口井的弱反射溶洞识别结果进行统计:共有 37 口井钻遇溶洞 40 个,溶洞钻遇率为 29%;平均洞高为 7.49m,其中高度大于 5m 的溶洞 17 个,占 42.5%,小于 5m 的溶洞共有 23 个,占 57.5%。结合放空漏失情况统计,得知弱反射特征井对应的是 5m 以下、漏失为主的小规模溶洞。

表 1 塔河油田奥陶系溶洞识别主要参照标准

溶洞类型	钻井显示	岩心显示	井径 in	自然伽马 API	无铀伽马 API	双侧向电阻率 $\Omega \cdot m$	FMI 成像测井
未充填洞穴型	放空漏失,钻时 <10min/m	未取心	扩径较明显	<20	<20	RD<20	整段明显深色图像
部分充填洞穴型	轻微漏失,钻时 >5min/m	未取心	较明显扩径	20~60	明显小于自然伽马	RD<20	洞内有明显淡色基岩图像
全充填洞穴型	无放空漏失,钻时 >5min/m	可见充填物性质	轻微扩径	>60	接近自然伽马	RD<20	洞内全深色或部分深色图像

从所钻遇的弱反射溶洞特征分析:溶洞主要发育在 T74 界面下浅层部位,越往深部岩溶作用越弱,溶蚀改造程度越差,溶洞欠发育。因此按溶洞钻遇情况在纵向上可分为三段:第一段为 T74 下 60m

内,该段内共发育溶洞 25 个,占识别溶洞总数的 62.5%,溶洞发育程度最高;第二段为 T74 下 60~120m,该段内发育溶洞 9 个,占识别溶洞总数的 22.5%;第三段为 T74 下 120m 以外,统计在该段内

发育溶洞6个,占识别溶洞总数的15.0%。从各弱反射特征井的纵向上分析,在三个深度段都发育的弱反射特征类型是宽波谷(三段平均洞高都大于5m)和弱串珠(三段平均洞高的差别较大,在2.15~40.30m之间)反射。

3.2 裂缝发育特征

裂缝线密度是指单位长度内的裂缝条数,通常裂缝线密度越大,其发育程度和连通程度就越高。对有成像测井资料的47口弱反射井的裂缝井段进行了裂缝层厚度统计及裂缝线密度计算。从裂缝线密度计算结果可知:裂缝线密度范围(0.02~8.50

条/m)变化很大,在T74界面下0~60m、60~120m及120m以外三个深度段中,在T74界面下60~120m范围裂缝线密度值最大(2.02条/m),对应内幕弱反射,在T74界面下120m以外裂缝线密度值最小(0.67条/m),对应弱串珠状反射。在T74界面下三个深度段中:宽波谷反射裂缝线密度分别为1.76,1.37,1.64条/m,呈现高、低、高的数值变化趋势;内幕弱反射裂缝线密度分别为1.65,2.02,1.35条/m,呈低、高、低的变化态势;杂乱弱反射裂缝线密度分别为0.83,1.33,1.46条/m,呈低、较高、高的变化态势(图2)。

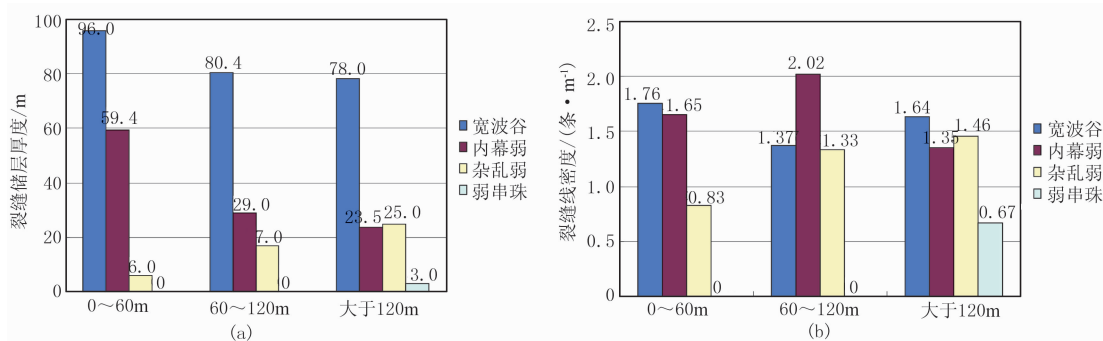


图2 塔河油田奥陶系弱反射储层(T74界面下不同深度段)的裂缝储层厚度(a)和裂缝线密度(b)直方图

3.3 单井平均储地比

单井储地比是指单井钻遇的I类、II类储集体厚度与相应钻井揭示T74界面下0~60m,60~120m,120m以上层段厚度的比值。为了突出溶洞型储层的储集空间优势,本文评价标准中将钻遇溶洞放空漏失的单井单独评价;并对覆盖区和剥蚀区的井分别进行统计分析、对比。宽波谷型反射钻遇放空漏失的比例最大,其次是杂乱弱反射,另外两类弱反射特征的井未钻遇放空漏失。钻遇I类储层的储地比大于0.3的两个层段均是弱反射特征为宽波谷的井,说明宽波谷型反射储层发育得最好,尤其在T74界面下0~60m层段内。

综上所述,钻遇溶洞平均厚度、发育裂缝平均厚度、溶洞发育程度、I类储层储地比以及裂缝发育程度等方面,均是弱反射特征为宽波谷型储层最发育。

4 弱反射地质模型

不同类型储层的发育特征和分布规律不同,导致储层在 seismic 剖面上反射特征的差异。通过对塔河

油田129口井弱反射储层发育的厚度、组合类型、储地比关系等方面的研究,明确了宽波谷、弱串珠、内幕弱(空白)和杂乱等四种弱反射特征的地质意义,建立了弱反射地质模型。

通过对研究区内各类弱反射井储层发育状况统计,明确了宽波谷、弱串珠、内幕弱(空白)和杂乱等四类弱反射储层特征及组合关系。

(1)宽波谷地质模型如图3a所示,宽波谷反射对应的储层段紧邻T74界面下发育,厚度范围是20~50m,中间发育10~30m厚的致密段,致密段之下储层段厚度约为10~30m。

(2)杂乱反射的地质模型如图3b所示,由20~30m不等的I类、II类储集体空间叠置而成,其中致密段间隔为10~20m,储层横向延伸范围较小,造成储层呈横向连续性差、纵向上多套叠置的特征。

(3)弱串珠反射地质模型如图3c所示,其上部储层段与宽波谷类似,紧邻T74界面下发育,厚度约为20~30m,其致密段较发育,厚度(80~100m)明显大于宽波谷,致密段之下储层段厚度约为20~40m。

(4)内幕弱(空白)反射地质模型表现为两种模

式(图 3d):一种类型是在 T74 界面下储层段零星发育,且储层较薄(5~10m);另一种类型是在 T74 界

面下储层段较发育,厚度为 40~50m,以裂缝储层为主,中间致密层较薄(5~10m),连续性好。

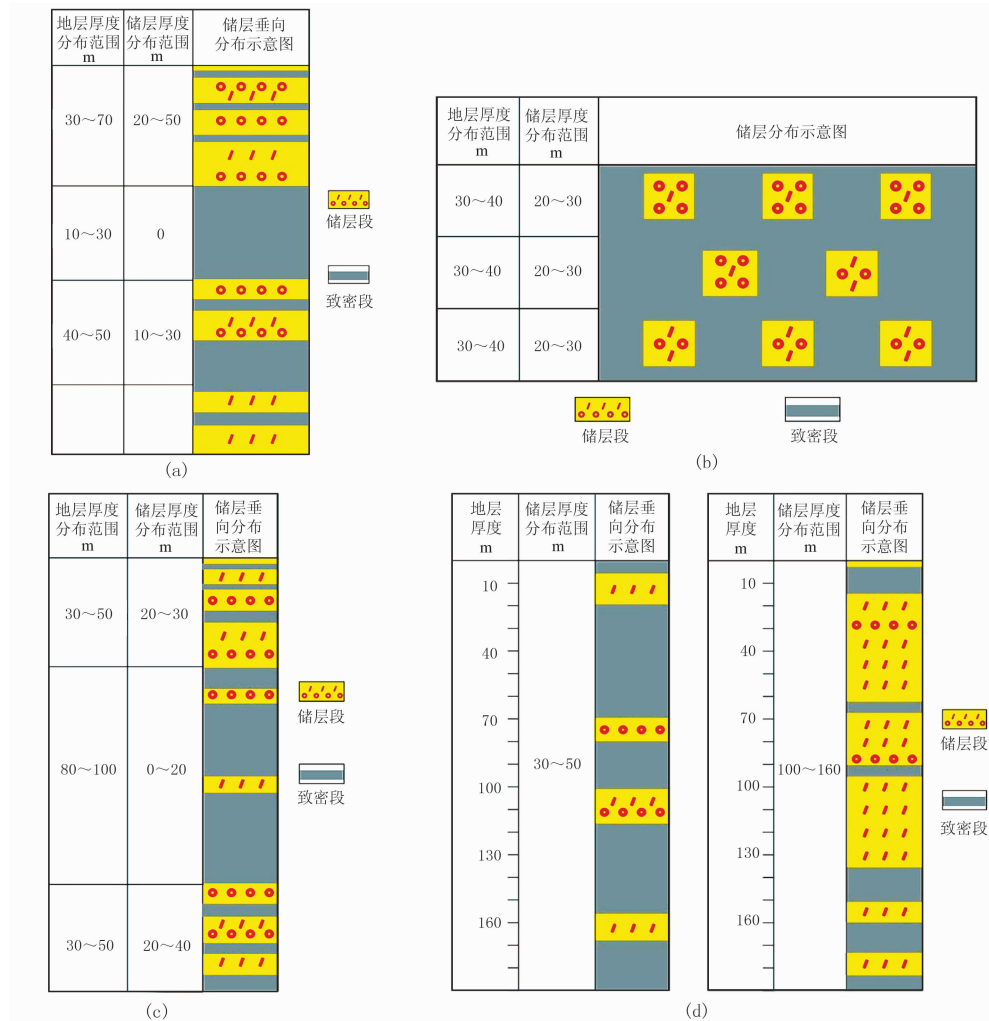


图 3 弱反射地质模型

(a)宽波谷反射; (b)杂乱反射; (c)弱串珠状反射; (d)内幕弱反射

5 弱反射形成机理

分析钻井、测井响应特征得知,钻遇“弱反射”特征井储层的发育程度受风化壳和裂缝的影响。通过建立其地质模型,可明确不同弱反射类型的储层发育特征及其组合规律。为了深入探讨弱反射形成机理,对不同弱反射地质模型进行正演模拟研究。

5.1 正演模拟设计

结合塔河地区实际地层的速度参数和缝洞规模,根据前述储层组合特征,参考已有的研究方法^[9~16],设计了简化的含有不同大小缝洞的水平层状二维模型,建立了宽波谷、弱串珠、内幕弱(空白)

和杂乱等四种弱反射缝洞储集体模型^[2]。图 4 上部的 F1 代表砂泥岩地层, F2 代表灰岩地层, F1 与 F2 间以灰岩界面 T74 相隔; 1~13 分别代表不同类型的裂缝—孔洞型储集体。设计砂泥岩地层速度为 5400m/s, 灰岩地层速度为 6000m/s, 地震子波频率为 30Hz, 可推算出子波长为 200m。本次模拟采用弹性波传播交错网格高阶差分法, 并采取了两项关键技术措施: 一是交错网格, 其局部差分精度是规则网格的四倍; 二是高阶差分, 可进一步提高差分精度, 减小数值频散。

5.2 地震响应特征

经过叠加处理及时间偏移处理, 最后得到的叠

前深度偏移剖面如图4下部所示。

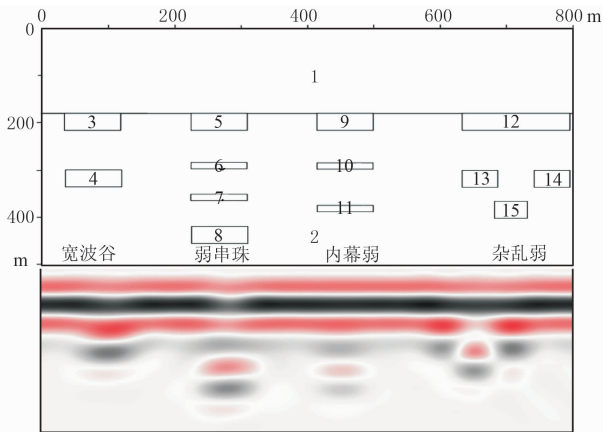


图4 不同储层组合地质模型及其地震响应图

宽波谷模型正演模拟结果表明,2号裂缝—孔洞带顶部距T74界面70m,大于1/4地震波长(50m),该处波形出现调谐现象,导致波谷处弧长拉大,振幅加强,形成宽波谷地震反射特征;并且由于紧邻地层界面发育裂缝—孔洞带,造成该处T74强同相轴振幅略有减弱。

从弱串珠模型正演模拟图看出,该模型整体形成弱串珠反射。T74界面强反射同相轴振幅在裂缝发育处略有减弱,弱串珠反射主要是最下方6号裂缝—孔洞带的地震响应。

从内幕弱(空白)反射模型正演模拟图看,由于其储层厚度为20m,小于1/4波长,地震响应较弱;紧邻地层界面下发育裂缝带,也造成该处T74强同相轴振幅略有减弱。

分析杂乱反射模型正演模拟结果,模型从上到下由四个裂缝—孔洞带组成倒“品”字分布,T74界面下方的地震响应整体呈杂乱状,主要为模型中呈倒“品”字型裂缝—孔洞带的响应。由于12号裂缝—孔洞带顶部距地层界面50m,正好约为1/4波长,故该处波形出现调谐现象,导致波谷处弧长拉大,振幅加强。由于紧邻T74界面发育裂缝—孔洞带,因此对应处T74强同相轴振幅也有所减弱。

5.3 地震响应特征与储层组合关系

通过正演模拟验证,弱反射中不同的反射特征是由于缝洞型储层与碳酸盐岩基质在空间的组合关系和样式发生改变,储层段厚度和空间延展宽度变化而造成宽波谷、弱串珠、内幕弱(空白)和杂乱等不同的弱反射特征。主要体现在以下两方面:

(1)裂缝—孔洞带的组合方式及与T74界面不

同距离形成不同地震反射类型。当裂缝—孔洞带顶部与T74界面的距离处于1/4波长与1/2波长之间,且溶蚀孔洞相对发育时,易形成宽波谷反射特征。分析实际剖面特征发现,对应宽波谷反射的储层横向分布范围较大,储层主要与灰岩的表层溶蚀作用有关。当裂缝—孔洞带顶部与T74界面距离大于或等于1/2波长时,在水平面上发育多个不规则排列缝洞体,且裂缝相对发育,易形成杂乱弱反射特征。分析实际剖面特征发现,杂乱弱反射对应的储层横向分布范围较大,主要与裂缝发育程度有关。当裂缝—孔洞带顶部与T74界面距离大于1/2波长时,常形成弱串珠反射特征。当裂缝—孔洞带顶部与T74界面距离大于1/2波长,且储层厚度较薄时,易形成内幕弱(空白)反射特征。

(2)如果T74界面下紧邻裂缝—孔洞构造,则该处T74同相轴振幅略有减弱,易形成相对弱振幅现象。说明该处表层经历了溶蚀和构造双重作用。

6 结论与建议

(1)据地震剖面上“弱反射”缝洞型储层的振幅大小、频率和地震属性的差异,将其划分为宽波谷、弱串珠、内幕弱(空白)和杂乱等四种类型。

(2)从储层特征统计分析得知,“弱反射”是小规模缝洞储集体的地震响应,储层发育程度低于“强串珠”储层。其中宽波谷型储层相对最为发育,杂乱反射型储层次之。

(3)正演模拟结果表明,缝洞型储集体空间组合的差异导致其反射特征的差异。宽波谷是距风化壳较近的缝洞储集体地震响应与风化壳地震响应叠加干涉的结果,预测宽波谷反射储层时需注意上覆风化壳界面强反射信号对下伏层弱信号的影响,以提高储层地震预测精度。

(4)在碳酸盐岩发育区,形成地震波弱反射的原因有很多种。因此,要从弱反射产生的地质背景出发,从地球物理角度认识弱反射的地震波运动学和动力学特征,研究其形成机理及识别方式,才能提高储层预测的精度。

(5)成像方法对碳酸盐岩内幕刻画有极大影响,新的成像方法对该区储层描述有重要推动作用。应加强高精度叠前地震成像方法(如RTM)的研究和应用。

(6)强化物理模型研究等基础性工作,以深化弱反射形成机理的认识。

参 考 文 献

- [1] 康玉柱. 塔里木盆地塔河大油田形成的地质条件及前景展望. 中国地质, 2003, 30(3): 315-319.
Kang Yuzhu. Geological characteristics of the formation of the large Tahe oilfield in the Tarim basin and its prospects. Geology in China, 2003, 30(3): 315-319.
- [2] 张勇, 韩文功, 苏朝光. 油气藏地震正演模型与分析. 北京: 石油工业出版社, 2009, 176-178.
- [3] 李凡异, 魏建新, 狄帮让等. 碳酸盐岩溶洞的“串珠”状地震反射特征形成机理研究. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 385-390.
Li Fanyi, Wei Jianxin, Di Bangrang et al. Formation mechanism research for bead-like seismic reflection of carbonate caves. OGP, 2012, 47(3): 385-390.
- [4] 胡中平. 溶洞地震波“串珠状”形成机理及识别方法. 中国西部油气地质, 2006, 2(4): 423-426.
Hu Zhongping. Mechanism and distinction method for the seismic “string beads” characteristic. West China Petroleum Geosciences, 2006, 2(4): 423-426.
- [5] 王洪求, 刘伟方, 郑多明等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩“非串珠状”缝洞型储层类型及成因. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 982-987.
Wang Hongqiu, Liu Weifang, Zheng Duoming et al. Types and causes of “None-string Beads” fracture-cavity reservoirs in Ordovician carbonate of Tarim basin. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6): 982-987.
- [6] 龙喜彬. 塔河油田缝洞型油藏未动用储量评价及开发对策探讨. 内蒙古石油化工, 2009, 13(2): 124-127.
Long Xibin. Discussion for evaluation and development policies of non-producing of reserves of the crack and hole reservoir of Tahe oil-field. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009, 13(2): 124-127.
- [7] 陆正元, 杨敏, 窦之林等. 塔河油田奥陶系油藏 TK440 井组注水压锥地质模式研究. 矿物岩石, 2009, 29(4): 95-99.
Lu Zheng yuan, Yang Min, Dou Zhilin et al. Study on geological model of pressure coning by water injection in well group TK440 of Ordovician reservoir in Tahe oilfield. Journal of Mineralogy and Petrology, 2009, 29(4): 95-99.
- [8] 王立华, 魏建新, 狄帮让. 溶洞物理模型地震响应及其属性分析. 石油地球物理勘探, 2008, 43(3): 291-296.
Wang Lihua, Wei Jianxin and Di Bangrang. Seismic response of Karst cave physical model and analysis of its attributes. OGP, 2008, 43(3): 291-296.
- [9] 闵小刚, 顾汉明, 朱定. 塔河油田孔洞模型的波动方程正演模拟. 勘探地球物理进展, 2006, 29(3): 187-191.
Min Xiaogang, Gu Hanming and Zhu Ding. Wave equation for forward modeling of cavern models in Tahe Oilfield. Progress in Exploration Geophysics, 2006, 29(3): 187-191.
- [10] 孙东, 王宏斌, 雍学善等. 直径 40m 溶洞距灰岩顶界面不同距离时的地震响应. 岩性油气藏, 2011, 23(1): 94-97.
Sun Dong, Wang Hongbin, Yong Xueshan et al. Seismic response of 40m caves with different distances from limestone top boundary. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(1): 94-97.
- [11] 李阳. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体识别及定量表征. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(1): 1-5.
Li Yang. Ordovician carbonate fracture-cavity reservoirs identification and quantitative characterization in Tahe Oilfield. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(1): 1-5.
- [12] 赵群, 曲寿利, 薛诗桂等. 碳酸盐岩溶洞物理模型地震响应特征研究. 石油物探, 2010, 49(4): 351-358.
Zhao Qun, Qu Shouli, Xue Shigui et al. Study on the seismic response characteristics on the physical model of carbonate cave. GPP, 2010, 49(4): 351-358.
- [13] 杨凤丽, 吴建勋, 董良国. 塔中白云岩岩溶储层地震正演模拟及其响应. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 53(12): 1724-1729.
Yang Fengli, Wu Jianxun, Dong Liangguo. Seismic forward modeling and its response of dolomite pe-leokarst reservoir in Tazhong area of China. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 53(12): 1724-1729.
- [14] 季敏, 魏建新, 王尚旭. 孔洞物理模型数据的地震响应特征分析. 石油地球物理勘探, 2009, 44(2): 196-200.
Ji Min, Wei Jianxin, Wang Shangxu. Analysis of seismic response of pore-cave physical model data. OGP, 2009, 44(2): 196-200.
- [15] 撒利明, 姚逢昌, 狄帮让等. 缝洞型储层地震响应特征与识别方法. 岩性油气藏, 2011, 23(1): 23-28.
Sa Liming, Yao Fengchang, Di Bangrang et al. Seismic response characteristics and identification method of fracture-cavity reservoir. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(1): 23-28.
- [16] White R E. Properties of instantaneous seismic attributes. The Leading Edge, 1991, 10(7): 26-32.

(本文编辑:朱汉东)

作者简介



马丽娟 高级工程师, 博士, 1966 年生; 1988 年本科毕业于石油大学勘查地球物理专业, 2000 和 2003 年先后在中国地质大学(北京)获矿产普查与勘探专业硕士和博士学位; 主要从事物探地质综合解释研究; 现在中石化地球物理公司从事物探技术研究和管理工作。