

文章编号:0253-9985(2012)03-0490-07

开发地震在大庆长垣喇嘛甸油田储层预测中的应用

王琦¹,李红梅²

(1. 中国石油 对外合作经理部,北京 10007; 2. 中国石油 大庆油田公司 第三采油厂,黑龙江 大庆 163113)

摘要:以喇嘛甸油田萨尔图油层为例,阐述了地震属性技术和重构地震反演的实践与应用。地震属性技术适合于刻画“泥包砂”型萨一组等的储层特征,尤其是井网控制程度较低的外扩区主河道预测。重构地震反演技术主要适用于高含水油田剩余油挖潜的研究,从而实现高精度井间砂体预测。研究认为,井震联合下的沉积相修正共归纳为河道侧积体、河道连续性(由连续变为间断、由间断变为连续)、河道规模(宽度、延伸长度、走向)、河道组合和河道期次5种模式。由此,利用测井曲线形态差异和高程差等特征,辅助反演切片研究河道垂向演化,最终确定单期河道边界。早期河道和晚期河道错综复杂叠置关系,构成了复杂剩余油空间关系,从而为下一步剩余油采出以及完善注采关系提供了良好的依据。

关键词:井震联合;地震属性;地震反演;开发地震;喇嘛甸油田;大庆长垣地区

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

Application of development seismology to reservoir prediction of Lamadian oilfield in Daqing placanticline

Wang Qi¹ and Li Hongmei²

(1. Foreign Cooperation Administration Department, CNPC, Beijing 10007, China;

2. The 3rd Oil Production Plant, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163113, China)

Abstract: Taking Saertu oil layer of Lamadian oilfield as an example, this paper discusses the application of seismic attribution technique and curve reconstruction and inversion technique. Seismic attribution technique is suitable for describing characteristics of reservoirs such as Sa I layer with sandstone interbedding in mudstone, especially the main channel sandbody in area with sparse well control. While, curve reconstruction and inversion technique is suitable for highly accurate prediction of inter-well sandbody, thus is critical for tapping remaining oil in oilfield with high water cut. Based on sedimentary facies correction through log/seismic integration, 5 models were built, including channel side accretion, channel continuity, channel size, channel combination and channel timing. Log differences and elevation changes are integrated with inversion slice to characterize the vertical evolution of channel sands and finally to determine the boundary of a single channel sandbody. The complex superimposition relationship between early channel sandbody and late channel sandbody determine the complicated spatial distribution of remaining oil. These understandings provide a solid basis for extracting the remaining oil and improving flood pattern.

Key words: log-seismic integration, seismic attribute, seismic inversion, development seismology, Lamadian oilfield, Daqing placanticline

大庆长垣油田开发至今,地下剩余油呈“整体 高度分散、局部相对富集”的格局^[1-4]。高效挖潜

收稿日期:2011-10-24;修订日期:2012-05-08。

第一作者简介:王琦(1979—),女,硕士研究生,煤层气勘探开发。

基金项目:国家科技重大专项(2008zx05010-001)。

剩余油的重点和难点是完善井间高精度储层展布特征,而开发地震是提供井间信息的最有效技术手段^[3-4]。然而,大庆油田长垣剩余油挖潜面临着严峻挑战,至少在以下几个方面还有待于做深入的工作。①过渡带外扩潜力挖潜。过渡带边部井控程度低,油水关系复杂,需要通过开发地震研究寻找扩边潜力。②砂体横向边界预测(沉积相)。落实砂体是挖潜剩余油首要工作,单纯依靠测井资料预测井间砂体分布精度较低,尚需应用开发地震精细预测井间砂体分布。③砂体接触关系与连通性。储层非均质强,有待于通过开展高精度地震反演与属性分析,确定砂体接触关系与连通性。在目前已提出的解决上述问题的各种方法中^[5],应该说地震属性技术和地震反演技术较其他方法具有更为可信的理论基础和实际意义。为此,笔者在研究、借鉴前人研究成果的基础上,以喇嘛甸油田萨尔图油层为试验区,试图探讨通过地震属性分析技术和地震反演技术的阐述,进一步明确明确了开发地震在大庆长垣老油田储层预测中的应用。

1 基本地质特征

喇嘛甸油田位于大庆长垣最北端,南与萨尔图油田相邻,油田内共划分10个区块,自北向南地层沉积厚度增加,油层相对厚度变薄(图1)。目前井网密度平均为50口/km²,平均井距150m,最小井距达40m。纵向上油层众多,开采油层从下至上划分为高台子油层、葡萄花油层、萨尔图油层。萨尔图油层为区内主要储层和含油(气)层位,其厚度分布为70~100m,纵向划分4个油层组和细分为31个沉积单元,顶部大规模含气。其中萨零和萨一油层组以薄砂层为主,两套稳定泥岩隔层使萨零、萨一和萨二之间形成良好遮挡条件。萨二和萨三油层组以厚油层为主,储集层以粉砂岩、细砂岩、泥质粉砂岩为主,属于典型的河流-三角洲相沉积砂体。

2 地震属性技术的应用

地震属性技术在油田勘探阶段发挥了重要的作用^[6],但是随着地震技术进入高含水油田开发

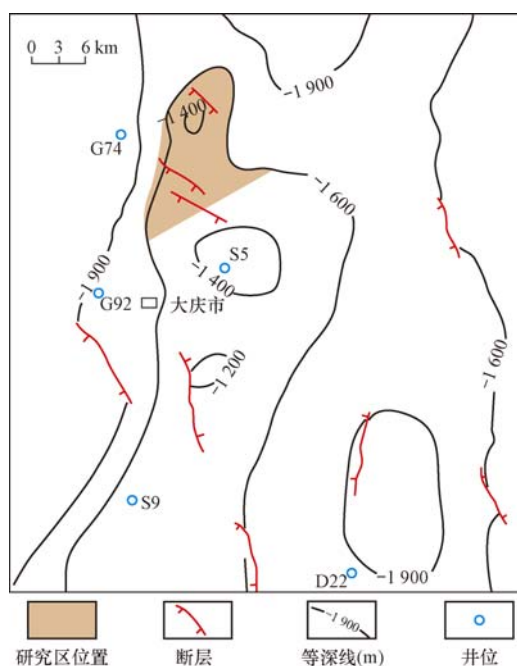


图1 喇嘛甸油田区域地质概况

Fig. 1 General regional geology map in Lamadian oilfield

领域,地震属技术应用出现了适应性问题^[4]。萨尔图油层萨一组满足“泥包砂”类型的储层条件,该层段在上覆下伏出现两段稳定泥岩隔层,即地震属性分析技术适合于该层段薄层预测,尤其是油田井网控制程度较低的外扩区。以北东外扩区萨一组为例,在对外扩区精细层位标定基础上,地震属性(分频属性)结果能够符合地震属性趋势,同时又符合于钻井地质认识,尤其对河道微相的预测,具有较高的预测精度。萨一组河道在各沉积时期经历了一个明显的发生、发展、消亡和再发生的演化过程(图2)。以S I₃沉积单元为界,萨一组在S I S II夹—S I₃沉积时期,区内共落实了发育3条河道。其中,靠近北端河道规模较大,延伸较远,共有7口井证实该河道存在,特征较为明显,而其他两条河道规模较小。同样在S I₃—S II₁沉积时期,在萨一识别出规模不同的5条分支河道。该5条分支河道均向南延伸至密井区,共有18口井在河道钻遇并得到证实,早期河道特征不明显,沉积晚期河道规模逐渐扩大,最后结合井区沉积相特征,完成地震属性向储层沉积的过渡。

3 重构地震反演技术的应用

对于开发程度较高的密井区而言,地震属性

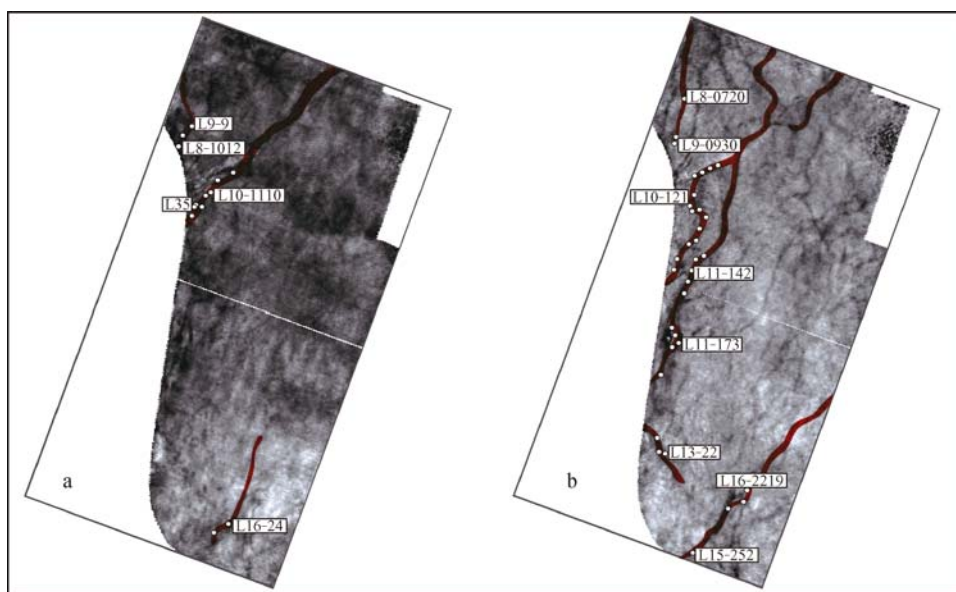


图2 喇嘛甸油田北东外扩区萨一组主河道分频属性

Fig. 2 Frequency attributes of the main channel sandbody in Sa-1 Formation in northwest Lamadian oilfield

分析技术纵向分辨率较低,存在一定的局限性。与之相对应,地震储层预测需要到小层级才能对油田开发具有实质意义,因此,重构地震反演技术可以实现高精度井间预测^[7-10]。实践表明,声波时差不能很好地反映储层和围岩的差异,使得反演结果无法进行岩性解释,为储层预测带来很大困难。为此,有必要构建一条能够反映储层物理特征信息的曲线,使其能够替代声波曲线参与反演,有效预测不同岩性的空间展布。重构反演的重点是对砂泥岩互层敏感的曲线选取^[11],分析得知微电极与微电位的曲线幅度差和深侧向电阻率曲线对砂泥岩区分较为敏感。笔者利用上述曲线与波阻抗曲线构建函数关系,分别开展了两种重构反演工作(文中涉及到反演剖面均为宽频带电阻率重构反演)。

重构反演能够在一定程度上克服测井曲线绘制连通剖面图的弊端,由于缺少井间的信息而使砂岩连通结果存在的偏差,反演成果对测井认识起到了补充和更正作用。图3显示出在萨尔图油层内砂体连通剖面,地震反演揭示了井间砂体变化情况,得到了较好的体现,纵向上可细分到沉积单元。在构造条件和沉积环境的作用下,井间砂体则表现为受断层等遮挡的影响(图3a),砂体不连通,呈断续分布(图3b)。同样,在L6-1635—L6-1535井间萨二组测井解释砂体连通图认为厚砂和薄砂侧向对接(蓝线部分),并且从右到左有

增大的趋势,而反演预测砂体为横向不连通(图3a)。在L6-163井的萨二组和萨三组部含油性变差,推测为沉积环境变化所致,这些在后期的开发调整井中获得了证实(图3b)。

4 地震反演在储层沉积中的应用

4.1 多元相关修正沉积相思路

开发地震反演的最终目的是解决井间砂体展布特征即平面沉积相的修正^[11-15]。但由于地震反演的多解性,因此,单项信息预测储层方法无法克服井间预测的多解性,难以达到满意的预测效果。克服多解性的最有效途径就是多信息的综合应用,这不仅可以解决地震反演预测时计算量巨大和属性之间的假相关等问题,而且可以定量标定诸如主体、非主体等沉积相类型,尽可能准确地预测出不同成因砂体的展布情况。以北西区为例,利用多元重构反演成果相关拟合,定量刻画沉积微相类型,该方法对于修正沉积相的效果较好。具体实现过程:首先,将宽频带电阻率重构反演和幅度差重构反演成果目的层以0.1 ms为间隔进行切片分析,求取井点处对应属性切片的最大值;其次,把统计的属性最大值进行交汇;最后,钻井目的层沉积微相类型投影到交汇图板内,得到各个微相值域范围,从而较好地区分河道砂、主体砂等

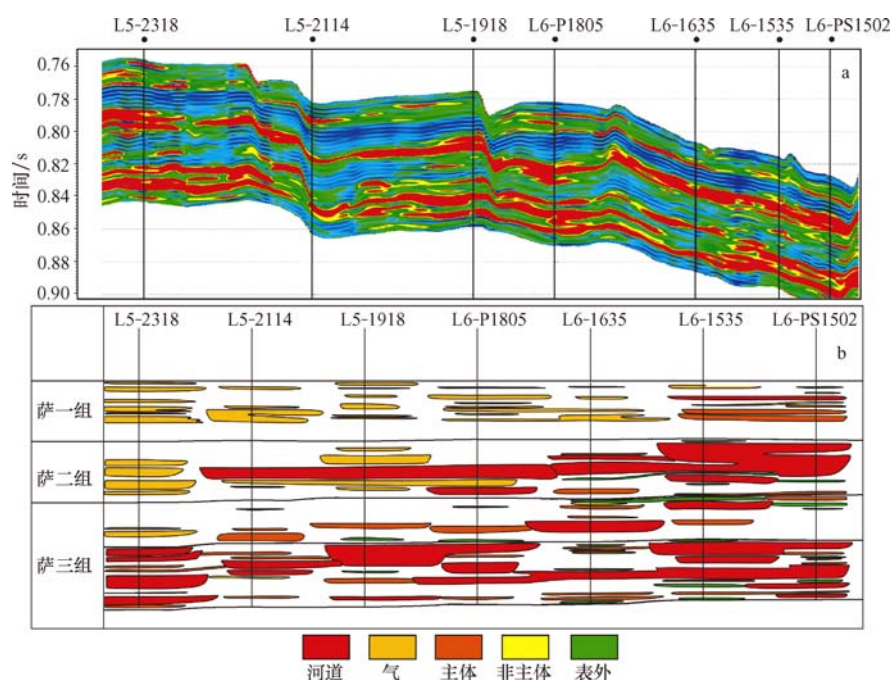


图3 喇嘛甸油田反演剖面与连井相对比

Fig. 3 Comparison between inversion profile and well-well facies in Lamadian oilfield

a. 北西区过井反演剖面; b. 北西区并震结合沉积相剖面

沉积微相(图4)。其中,主体席状砂电阻率反演属性最大值大于 $5.8 \Omega \cdot \text{m}$,而幅度差反演属性最大值大于 $3.0 \Omega \cdot \text{m}$;河道砂电性反演属性最大值大于 $16 \Omega \cdot \text{m}$,而幅度差反演属性最大值大于 $4.8 \Omega \cdot \text{m}$ 。

4.2 井震联合修正沉积相

在地震反演的基础上,结合钻井地质信息,利用沉积单元内的反演切片,准确定位垂向上砂体

间接触关系和横向砂体连通特征(图5),完成了井震联合沉积相修正。

4.2.1 河道侧积体

诸如洪水等一次事件,河曲凹岸被强烈侵蚀,相应地在凸岸侧积面之上就沉积一个侧积体,河道就发生一次迁移。在 S_{III_3} 沉积单元沉积早期,由东北部经过 L6-16 井区的分支河道物源较强,水动力较大,初期河流流动方向由东北向西南,随着沉积继续推进,此物源逐渐萎缩、减弱,河流流向发生改变,走向为西北-东南方向,在 L6-16 井左侧形成侧积体。反演切片上早期西侧为砂岩高值区,晚期西侧砂岩减少,反演剖面看均识别出透镜状河道砂体。通常该类型砂体侧缘相带的油层物性差,水淹程度较低,因而剩余油相对富集。

4.2.2 河道连续性变化

河道连续性变化主要是间歇性沉积所造成的,具体分为两种情况:河道原为间断,修正后为连续;河道原为连续,修正后为间断。

1) 河道原为间断,修正后为连续

以 S_{III_3} 在沉积时期为例,过 L4-1931 井的

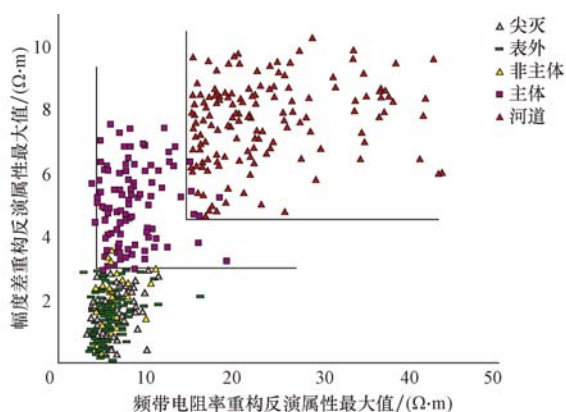


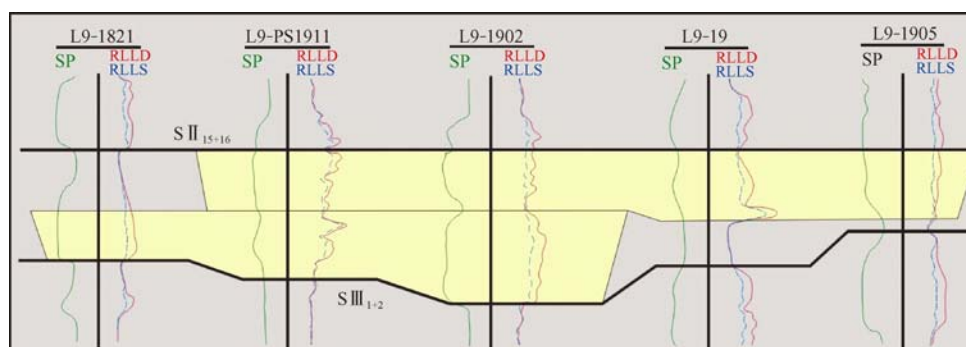
图4 喇嘛甸油田电阻率重构反演和幅度差重构反演交汇图

Fig. 4 Cross plot of resistivity and amplitude difference reconstruction inversion in Lamadian oilfield

沉积相 局部变换	模式图		应用实例				
			沉积 单元	不同时期沿层地震反演切片		原沉积相	修正后沉积相
河道侧积体			萨Ⅲ ₅				
河道连续性变化	连续变间断		萨Ⅱ ₄				
	间断变连续		萨Ⅲ ₉				
河道规模变化			萨Ⅲ ₆₊₇				

图 5 喇嘛甸油田井震联合沉积相修正模式总结与应用

Fig. 5 Summarization and application of log-seismic integration sedimentary facies modification models in Lamadian oilfield

图 6 喇嘛甸油田东北一区 S II₁₅₊₁₆ 沉积单元典型多期河道连井剖面示意图Fig. 6 Sketch map showing the well profile of typical multiple-phase channel sandbodies in S II₁₅₊₁₆ unit in northeast Lamadian oilfield

沉积早期分支河道物源较强,水动力较大,河流流动方向发生改向,为连续河道沉积。此后随着物源逐渐减弱,砂体厚度变薄,但沉积未曾间断,井之间砂体仍连通,在反演剖面上为一连续条带砂体,在 S III₉ 沉积单元顶面下沿 1.2 ms 和下沿 0.6 ms 反演切片上井间均表现为一砂体发育区。

2) 河道原为连续,修正后为间断

该类型沉积相通常处于非主分支河道处,多位于沉积物源较弱区域。以 S II₄ 沉积单元为例,来自北部物源河道沉积体在 L6 - P1625 井区附近分成两部分,存在近南北向主分支河道和东北向次分支河道,反演切片的次分支河道砂体向东南方向延伸约 120 m 消失,之后砂体不发育。因此

修改为间断河道沉积。

4.2.3 河道规模和组合发生变化

河道组合变化主要包括河道宽度、延伸长度、走向发生变化,利用地震反演预测井间砂体发育规模,能够克服主观因素的影响。如 S III₆₊₇ 沉积单元原沉积相图认为从自北部 L6 - 1427 井的分支河道在 L6 - 1427 井的南部没有东南分支,直接向南延伸。沿层反演切片显示沉积早期西南分支河流物源较弱,之后逐渐加强,在沉积中期,西南分支砂体逐渐加强,在沉积晚期略有减弱。因此,修改后该河道在 L6 - 1427 井向南分为两部分,一支向南延伸,一支向东南延伸再汇聚。

4.2.4 多期河道划分

常见多期河道叠加而成复合砂体,自然电位等曲线为多个叠加的钟形,连井对比曲线形态差异大、存在高程差,平面上通常为宽带状和网状分布。在多期河道划分方面,利用测井曲线横向对比特征,辅助反演切片研究河道垂向演化,最终确定单期河道边界。以北东一区 SII_{15+16} 沉积单元为例,过 L9-1902 连井曲线上存在高程差(图6),南北向早期河道砂体延伸短,而晚期为一前积现象,较早期河道延伸远 2 个井排(>300 m);东西向反演剖面为晚期是两条独立非连通河道砂,而早期东北部发育为一条河道,显然东部砂体较西部厚。

沉积相带控制着储层砂体的分布和注入水在油层中的运移,是影响剩余油分布的主要因素^[16]。北东一区为河道发育沉积单元,其中区内晚期河道较发育,尤其是东侧发育较好,河道规模较大,早期河道和晚期河道错综复杂叠置关系,构成了 SII_{15+16} 沉积单元复杂剩余油空间关系。两期河道间或以低渗透薄层砂相接触,或以废弃河道泥质充填物或以尖灭区相连接,这些部位是剩余油富集的有利场所。对于厚层正韵律河道砂体,中心相带往往水淹严重,驱油效率高,剩余油饱和度低。如果有泥质薄夹层存在或尖灭区,会使部分油层未遭水淹或轻度遭水淹,则会有较多的剩余油分布。

致谢:感谢审稿人和编辑部老师对本文的无私帮助,同时感谢东北石油大学李占东博士后在本文撰写过程中提供的支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] 刘振武,撒利明,董世泰,等. 中国石油天然气集团公司物探科技创新能力分析[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(3):462-471.
Liu Zhenwu, Sa Liming, Dong Shitai, et al. Analysis on scientific and technological innovation ability of China National Petroleum Cooperation in Geophysical Exploration[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(3):462-471.
- [2] 刘振武,撒利明,张昕,等. 中国石油开发地震技术应用现状和未来发展建议[J]. 石油学报, 2009, 30(5):711-721.
Liu Zhenwu, Sa Liming, Zhang Xin, et al. Current application and future development of production seismology in PetroChina[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5):711-721.
- [3] 韩大匡. 准确预测剩余油相对富集区提高油田注水采收率研究[J]. 石油学报, 2007, 28(2):73-78.
Han Dakuang. Precisely predicting abundant remaining oil and improving the secondary recovery of mature oilfields[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2):73-78.
- [4] 刘文岭,韩大匡,胡水清,等. 高含水油田发展油藏地球物理技术的思考与实践[J]. 石油学报, 2009, 30(4):550-559.
Liu Wenling, Han Dangkuang, Hu Shuiqing, et al. Consideration and practice of reservoir geophysics techniques in development of mature oilfields with high water cut[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4):550-559.
- [5] 刘文岭. 高含水油田油藏地球物理技术——中国石油物探的新领域[J]. 石油学报, 2010, 31(6):959-965.
Liu Wenling. Reservoir geophysics techniques in development of mature oilfield with high water cut: a new research area of geophysical prospecting for petroleum in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6):959-965.
- [6] 李东安,宁俊瑞,刘振峰. 用神经网络和地质统计学综合多元信息进行储层预测[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4):493-498, 503.
Li Dongan, Ning Junrui, Liu Zhenfeng. Reservoir prediction with integrated information based on artificial neural network technology and geostatistics[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(4):493-498, 503.
- [7] 季玉新,刘春园,陈冬,等. 分频反演方法及其在塔河 A 区储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1):38-42.
Ji Yuxin, Liu Chunyuan, Cheng Dong, et al. Frequency divided inversion and its application to reservoir prediction in Block A of Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1):38-42.
- [8] 单敬福,王峰,孙海雷,等. 基于地震波阻抗反演的小层砂体预测技术——在大庆油田州 57 水平井区块的应用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2):212-218.
Shan Jinfu, Wang Feng, Sui Hailei, et al. Prediction of sublayer sandstones based on wave impedance inversion in the wellblock of the horizontal well Zhou57[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2):212-218.
- [9] 黄伏生,李占东,卢双舫,等. 宽频带重构反演在喇嘛甸油田北东一区萨尔图油层的应用[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(35):8682-8686.
Huang Fusheng, Li Zhandong, Lu Shuangfang, et al. The application of broadband remodeling inversion in saertu oil bed of the first northeast area in Lamadian oil field[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(35):8682-8686.
- [10] 陈汉军,叶泰然,郭伟,等. 云南曲靖盆地浅层气藏地震储层预测及勘探前景分析[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2):207-213.
Chen Hanjun, Ye Tairan, Guo Wei, et al. Seismic reservoir prediction and exploration prospect analysis of shallow gas reservoirs in the Qujing Basin, Yunnan province[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2):207-213.
- [11] 李占东,赵伟,李阳,等. 开发地震反演可行性研究及应

- 用——以大庆长垣北部油田为例[J]. 石油与天然气地质, 2011, 54(32): 797–806.
- Li Zhan-Dong, Zhao Wei, Li Yang, et al. The feasibility study and application of development seismic inversion—a case study from northern Changyuan oilfield of Daqing area[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 54(32): 797–806.
- [12] 朱定, 孙素琴, 蒋进勇. 分频解释技术在塔河油田储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 49–53.
- Zhu Ding, Sun Suqin, Jiang Jinyong. Application of frequency division interpretation technique to reservoir prediction in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 49–53.
- [13] 张云银, 杨泽蓉, 孙淑艳, 等. 临南洼陷三角洲地震岩相解释方法[J]. 石油与天然气地质, 2011, 31(3): 404–410.
- Zhang Yunyin, Yang Zerong, Sun Shuyan, et al. Seismic lithofacies interpretation of delta deposits in the Linnan subsag[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 31(3): 404–410.
- [14] 尹兵祥, 杨剑萍, 尹克敏, 等. 东营凹陷永安地区地震反演及储层预测[J]. 石油物探, 2011, 50(1): 59–64.
- Yin Bingxiang, Yang Jianping, Yin Kemin, et al. Seismic inversion and reservoir prediction in Yongan area, Dongying Sag[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(1): 59–64.
- [15] 彭才; 张延充; 梅燕; , 等. 川中地区飞仙关组高能鲕滩储层地震预测[J]. 石油物探, 2010, 49(5): 504–508.
- Peng Cai, Zhang Yanchong, Mei Yan, et al. Seismic prediction on high-energy oolitic-beach reservoir of Feixianguan Formation in central Sichuan Basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, (1): 504–508.
- [16] 江青春, 王海, 李丹, 等. 地震波形分类技术应用条件及其在葡北地区沉积微相研究中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2012, 3(1): 135–140.
- Jiang Qingchun, Wang Hai, Li Dan. Application conditions of seismic waveform classification technique and its use in the study of sedimentary microfacies of Pubei area[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 135–140.

(编辑 高 岩)

(上接第489页)

- [12] 丁勇, 彭守涛, 李会军. 塔河油田及塔北碳酸盐岩油藏特征与成藏主控因素[J]. 石油实验地质, 2011, 33(5): 488–494.
- Ding Yong, Peng Shoutao, Li Huijun. Features and main controlling factors of carbonate reservoirs in Tahe Oilfield and northern Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(5): 488–494.
- [13] 马学军, 费建博, 王建斌, 等. 塔中奥陶系缝洞系统成像的配套处理技术研究[J]. 石油物探, 2011, 50(6): 583–588.
- Ma Xuejun, Fei Jianbo, Wang Jianbing, et al. Study on the supporting processing techniques for the imaging of Ordovician fracture-cavity system in Tazhong area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(6): 583–588.
- [14] 鲁新便, 蔡忠贤. 缝洞型碳酸盐岩油藏古溶洞系统与油气开发——以塔河碳酸盐岩溶洞型油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 22–27.
- Lu Xinbian, Cai Zhongxian. A study of the paleo-cavern system in fractured-vuggy carbonate reservoirs and oil/gas development—taking the reservoirs in Tahe oilfield as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 22–27.
- [15] 程倩, 李阳, 熊伟, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏介质理论[J]. 大庆石油地质与开发, 2009, 28(4): 35–38.
- Cheng Qian, Li Yang, Xiong wei, et al. Theory of fracture-vuggy carbonate rock reservoir medium[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2009, 28(4): 35–38.
- [16] 程倩, 李阳, 熊伟, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏基岩块渗流特征初探[J]. 大庆石油地质与开发, 2010, 25(3): 98–100.
- Cheng Qian, Li Yang, Xiong wei, et al. Discussion on flow characteristics for the matrix rock of cavity-fractured carbonate oil reservoir[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2010, 25(3): 98–100.
- [17] 漆立新, 云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 1–12.
- Qi Lixin, Yun Lu. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 1–12.
- [18] 宋化明, 刘建军. 塔河油田四区缝洞性油藏缝洞单元划分方法研究[J]. 石油地质与工程, 2011, 25(3): 61–64.
- Song Huaming, Liu Jianjun. Study on fracture-cavity reservoir fracture-cavity unit division method in Tahe oilfield 4 block[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(3): 61–64.
- [19] 陈志海, 马旭杰, 黄广涛. 缝洞型碳酸盐岩油藏缝洞单元划分方法研究——以塔河油田奥陶系油藏主力开发区为例[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 847–855.
- Chen Zhihai, Ma Xujie, Huang Guangtao. Research on the fracture-vug unit division of fractured-vuggy carbonate rock oil pools—an example from the Ordovician oil pools in the principle producing area of Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 847–855.

(编辑 李 军)