

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.09.018

深层砂泥岩薄互层的地震识别方法

杨 飞¹, 黄 诚¹, 李鹏飞¹, 桂红兵²

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100;

2. 中海油田服务股份有限公司物探事业部, 天津 300452)

摘 要: 深层砂泥岩薄互层油气藏是一类典型的低孔、低渗型油气藏, 储层一般具有埋藏深、横向变化快、深层物性差的特点。利用常规的薄层定量描述方法只能识别地层厚度不小于 $\lambda/4$ 的孤立薄层, 很难实现精细解释。为此, 采用正-反演联合预测技术, 通过建立符合地下实际情况的地球物理模型, 从正演角度分析目的层的地震波场特征; 同时对正演结果进行模型反演, 定量分析反演砂体的横向及纵向展布特征。结果表明这种基于模型正演的地震识别方法既能够发挥地震资料在地层横向展布上的优势, 又能够提高纵向上的解释精度, 为识别前梨园地区深层砂、泥岩互层结构的隐蔽性储层提供参考。

关键词: 深层隐蔽油气藏; 砂泥岩薄互层; 正演模拟; 波阻抗反演; 储层预测精度

中图分类号: TE132

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)09-136-08

Seismic identification method of deep thin sand shale interbedding

YANG Fei¹, HUANG Cheng¹, LI Pengfei¹, GUI Hongbing²

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources,

Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

2. Geophysical Department, Oilfield Services Limited, CNOOC, Tianjin 300452, China)

Abstract: The deep interbeds of sand and shale reservoir is a kind of typical low porosity and low permeability reservoir, which generally has the characteristics of deep burial, rapid lateral variation, and deep physical difference, etc. The traditional thin layer quantitative description method can only identify the stratigraphic whose thickness is less than $\lambda/4$, and it's difficult to realize fine interpretation. Therefore, the paper firstly uses inversion joint prediction techniques to establish geological models for wave equation forward, and then analysis the target layer's characteristics of seismic wave field from the forward angle. Finally, we apply wave impedance inversion that is based on forward modeling results to make quantitative analysis for inversion sand's horizontal and vertical distribution characteristics. The results show that the seismic identification method which is based on forward model can not only unleash the advantages of seismic horizontal distribution, but also improve the accuracy of interpretation in the vertical direction. And the results can provide references for identifying deep thin sand shale interbedding reservoirs in Qianliyuan area.

Key words: deep subtle reservoirs; thin sand shale interbedding; forward simulation; acoustic impedance inversion; the reservoir prediction accuracy

收稿日期: 2014-07-15

基金项目: 国家大型油气田及煤层气开发科技专项资助项目(2011ZX05006-004)

作者简介: 杨飞(1967-), 男, 长江大学副教授, 博士后, 主要研究方向为地震资料综合解释、储层预测与评价等。

黄诚(联系人), 女, 长江大学硕士研究生, 主要研究方向为地震资料综合解释、储层预测与评价等, (E-mail) 2534098287@qq.com。

沙三中段主要为一套深灰色泥岩夹稳定页岩与砂岩-粉砂岩组成的砂泥岩互层^[15]。

沙三中段油气藏总体上具有埋藏深、深层物性差的特点。岩石物理研究表明,当地层埋深大于 3 500 m 时,砂岩的密度、纵波速度和纵波阻抗的分布范围分别为 2.38~2.69 g/cm³、4 000~5 100 m/s 和 10 000~13 000 g/cm³·m/s;而泥岩的密度、纵波速度和纵波阻抗的分布范围分别为 2.42~2.72 g/cm³、3 000~4 400 m/s 和 7 000~12 000 g/cm³·m/s。砂岩的波阻抗相对较高,泥岩的波阻抗相对较低。

2 声波方程正演原理

常规地震勘探只有纵波资料,因此,声波方程是研究地震波传播规律与现象的很好近似方程。当不考虑震源项时,二维均匀介质中的声波方程具有如下形式:

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

式中, v 为地震波的传播速度, p 为压力项。式(1)是从动力学角度来描述地震波的传播规律^[12]。

以函数 p 在 x 方向上的 $2n$ 阶差分方程为例,将 $p(x+k\Delta x)$ 与 $p(x-k\Delta x)$ 在 x 点按照 Taylor 公式进行展开,并将两项展开结果相减后化简得如下表达式:

$$p(x+k\Delta x) - 2p(x) + p(x-k\Delta x) = 2 \sum_{i=1}^n \frac{(k\Delta x)^{2i}}{(2i)!} p^{(2i)}(x) + O(\Delta x^{2n+2}), \quad (2)$$

式中, $p^{(n)}(x)$ 是 $p(x)$ 的 n 阶导数, k 取 1,2,3,……。消除高于二阶的导数项,可得到空间上的 $2n$ 阶差分逼近式为:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{\Delta x^2} \sum_{i=1}^n c_i d_i + O(\Delta x^{2n}), \quad (3)$$

式中, $d_i = p(x+i\Delta x) - 2p(x) + p(x-i\Delta x)$, c_i (其中 $i=1,2,\dots,n$)为 $2n$ 阶精度有限差分二阶中心导数的差分系数,可以通过求解方程组得到^[16-17]。

3 应用分析

3.1 实际地震资料分析

前梨园地区采用的高精度地震采集技术为本次开展深层砂泥岩薄互层型隐蔽储层的地震地质研究创造了条件。研究采用的是高分辨率地震资料,实际主频为 24 Hz 左右,野外采集参数具体为:炮间距 20 m,道间距 10 m,最小偏移距 0 m,采样率 1 ms。选取典型二维地震剖面,如图 2 所示。正演模拟符合该剖面的地质模型。

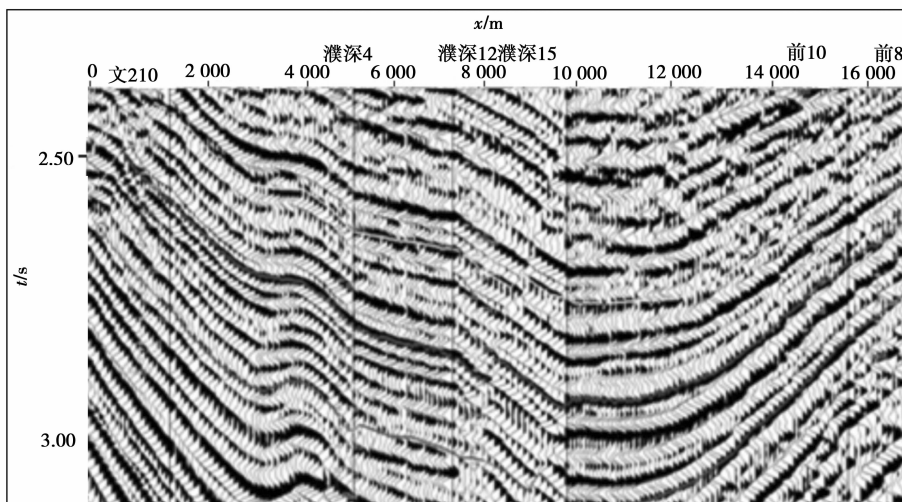


图 2 过文 210-濮深 4-濮深 12-濮深 15-前 10-前 8 井的实际地震剖面

3.2 单层厚度 10~15 m 的薄互层模型

正演模型参数来自于实际的地质情况的简化与抽象。按照图 2 中地震剖面的尺度,设计的模型长度为

20 000 m,深度为 7 000 m,地质层位 10 个,如图 3 所示。

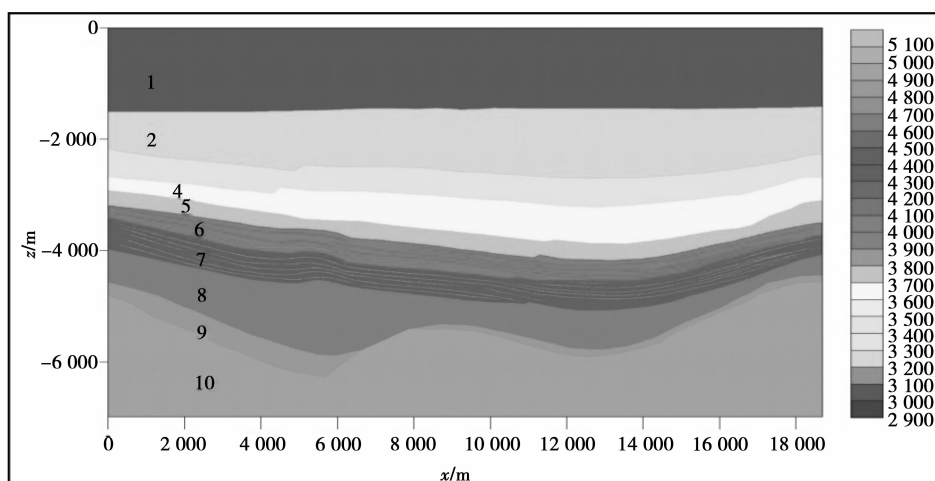


图 3 10~15 m 砂体厚度模型

由于沙三中段厚度较大,砂、泥岩物性变化明显,因此,将其分为两个小层,分别是 6 和 7 号地层,其深度在 3 500 m 以下。6 和 7 号地层相比其他地层具有更精细的速度结构,为砂泥岩薄互层结构。单层砂岩的最小厚度为 10 m,最大为 15 m。

模型中各地层以及薄层砂岩的纵波速度和密度为相应层段测井曲线的平均值,具体的参数设置见表 1。

表 1 模型 1 各层速度及密度参数

层	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	砂体
$V_p/(m \cdot s^{-1})$	3 000	3 200	3 400	3 600	3 700	4 000	4 400	4 700	4 850	5 000	4 800
$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	2 200	2 230	2 250	2 078	2 420	2 450	2 410	2 455	2 477	2 500	2 470

正演地震子波为主频 24 Hz 的雷克子波。采集参数按照野外实际采集参数来设置,具体参数为:炮间距 20 m,道间距 10 m,最小偏移距 0 m,采样率 1 ms。正演地震记录的最终偏移结果如图 4 所示。

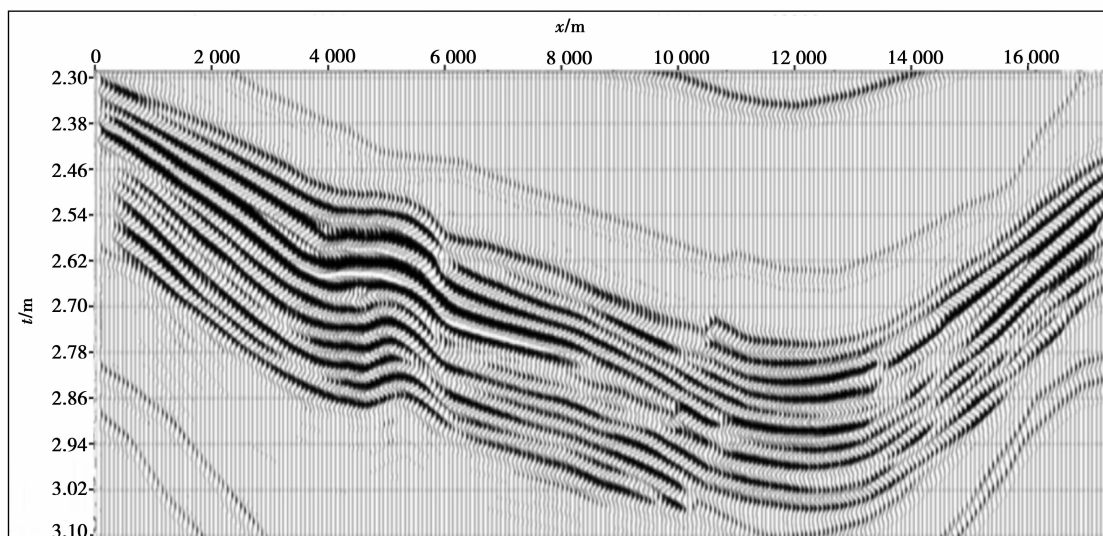


图 4 10~15 m 砂体厚度模型的偏移剖面

为了验证地质模型的合理性,将正演记录的偏移剖面与实际地震剖面进行井旁地震道的反射波组对比^[18-19],如图 5 所示。从图中可以看出,目的层正演结果与实际地震资料在反射轴数量及吻合度上具有较高

的一致性。从振幅强弱上来说,目的层及层内砂体的地震反射特征显示为强振幅,波形清晰,且波组连续性较好,这与砂岩具有相对较高的波阻抗有关。总体来说正演记录与实际地震剖面相关性好,说明地质模型的正确性及可靠性。

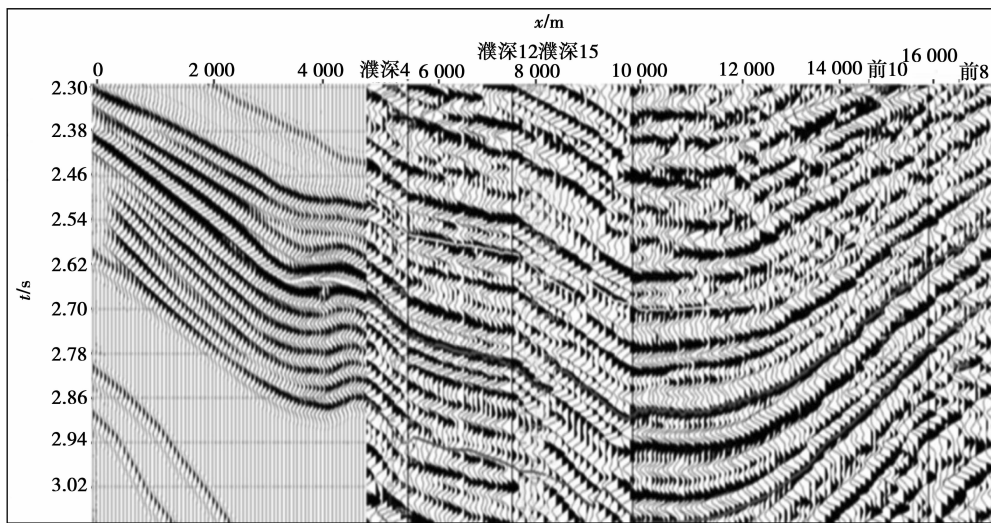


图 5 濮深 4 井正演结果剖面与实际地震剖面对比

在正演模拟方法的基础上,提出了对正演结果进行模型反演的方法,将正演的波场信息(反射轴数量、振幅强弱及波形变化等)量化为反演的砂体厚度,并与井上砂体做对比分析。

模型反演方法主要是基于实际井资料的约束稀疏脉冲反演。考虑到目标储层(6、7层)较厚,砂、泥岩物性变化较大,因此,本次反演为了更好地分辨各层内部变化细节,选择将 6、7 层分层段各自单独进行反演计算。反演过程中,以测井声阻抗为约束,在二维测线解释层位的控制下,对所有穿过测线的井进行内插外推得到初始模型^[19]。由初始模型与合成记录计算的带宽波阻抗体合并,最终得到如图 6、7 中反演体。

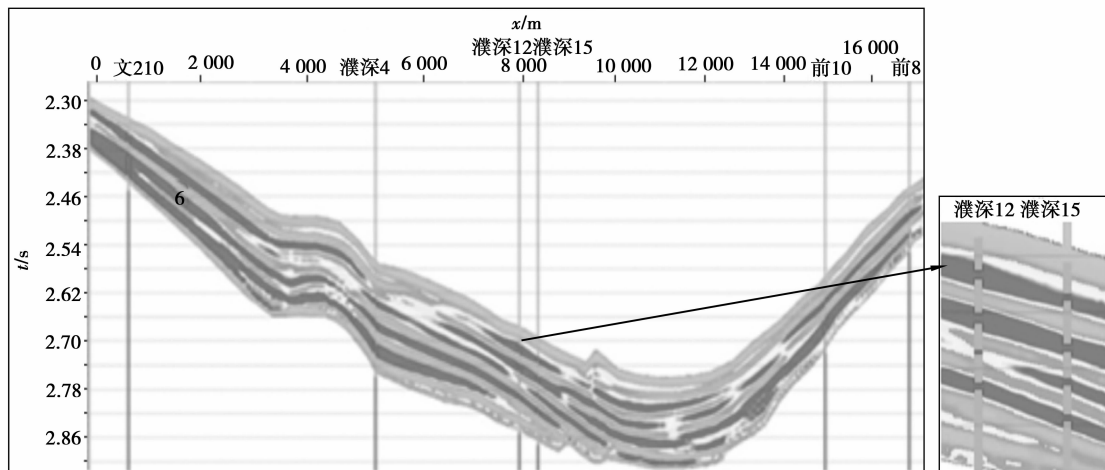


图 6 10~15 m 厚度砂体 6 层波阻抗反演结果

反演结果表明,目的层砂体相对比较发育。在横向展布上,砂、泥岩互层现象明显,且能清晰地展示砂体结构的变化特征。在纵向上,反演砂体的厚度与钻井资料相对较吻合,但反演砂体厚度远远大于井旁砂体的厚度,部分地区出现一个反演砂体对应井上多个砂体的情况,说明反演不能识别出厚度小于 10 m 的单砂体。

3.3 单砂层厚度 20~25 m 的薄互层模型

在 3.2 节中,正演模型的 6、7 两套地层中单砂层的厚度为 10~15 m,通过反演认为反演尚不能识别出厚度小于 10 m 的单砂体。所以,将 6、7 两套地层中单砂层的厚度调整为 20~25 m,其余参数均保持不变。采用相同的正演参数及其资料处理流程,得到了偏移剖面。最后对偏移剖面进行稀疏脉冲反演,得到的反演体

如图 8、9 所示。

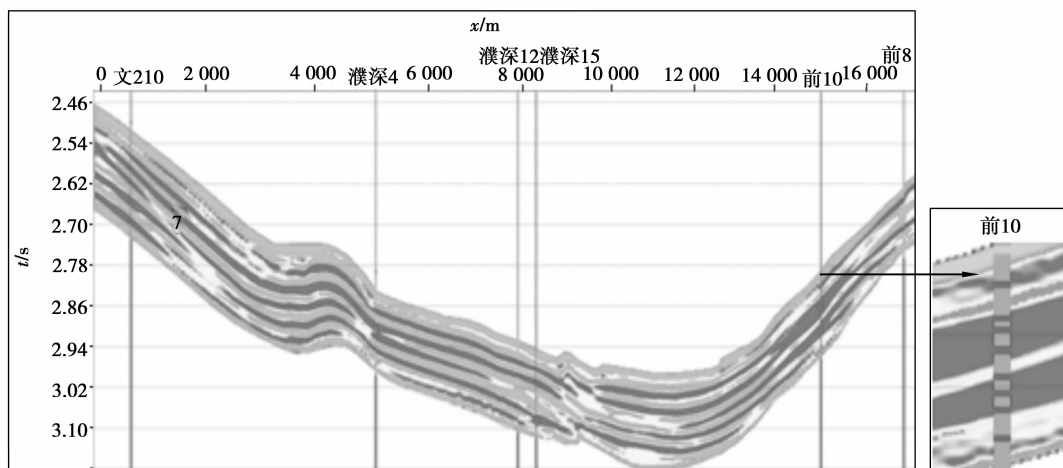


图 7 10~15 m 厚度砂体 7 层波阻抗反演结果

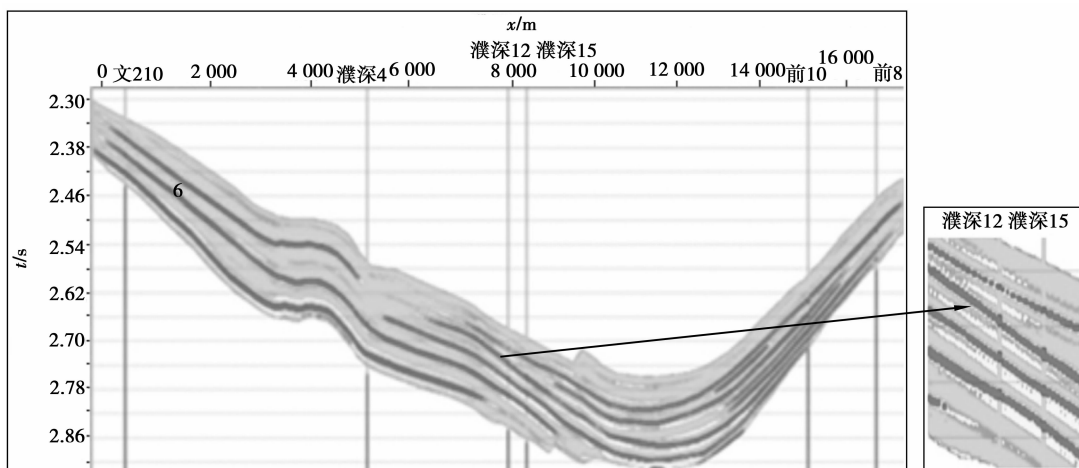


图 8 20~25 m 厚度砂体 6 层波阻抗反演结果

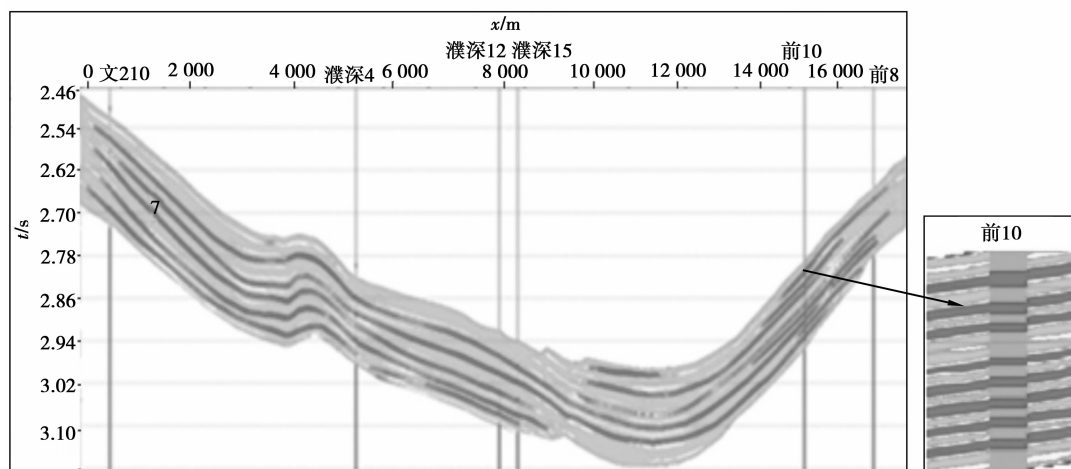


图 9 20~25 m 厚度砂体 7 层波阻抗反演结果

反演结果表明,目的层砂体相对比较发育。在横向展布上,砂、泥岩互层现象明显,且能清晰地展示砂体结构的变化特征。在纵向上,反演砂体的厚度与钻井资料的解释厚度吻合性高,对应关系较好。说明模型反演方法能识别厚度为 20 m 的单砂体。

4 结 语

结合研究区的特点,按照 Widess 准则,实际地震波形的分辨率为 $43 \text{ m}(\lambda/4)$ 左右,利用正、反演方法所研究的单砂体厚度能够细化到 10 m ,而模型反演方法能识别最小厚度为 20 m 的单砂体。因此,基于正、反演的地震识别方法既能够发挥地震资料在地层横向展布上的优势,又能够在一定程度上提高纵向上的分辨率,为东濮凹陷深层砂、岩互层结构的隐蔽性储层识别工作提供参考。

在本次的正演模拟的基础上,确定了下一步的工作计划,主要是进一步分析东濮深层地震波反射特征影响因素,包括衰减因子 Q 、噪音、不同岩性组合等。

参考文献:

- [1] 刘金平, 候亚兵, 杨懋新, 等. 叠前属性在薄互层储层预测中的应用[J]. 天然气工业, 2007, 12(1): 262-264.
LIU Jinping, HOU Yabing, YANG Maoxin, et al. The application of pre-stack attribute in the prediction of interbed[J]. Natural Gas Industry, 2007, 12(1): 262-264.
- [2] Widess M. How thin is a thin bed? [J]. Geophysics, 1973, 38(6): 1176-1180.
- [3] 宋新武, 郑浚茂, 范兴燕, 等. 基于 Ricker 子波匹配追踪算法在薄互层砂体储层预测中的应用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(1): 387-392.
SONG Xinwu, ZHENG Junmao, FAN Xingyan, et al. Application of the thin-interbedded reservoir prediction based on Ricker wavelet match tracing algorithm[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(1): 387-392.
- [4] Kallweit R, Wood L. The limits of resolution of zero-phase wavelets[J]. Geophysics, 1982, 47(7): 1035-1046.
- [5] Zeng H, Backus M. Interpretive advantages of 90° phase wavelets: Part 1: Seismic applications[J]. Geophysics, 2005, 70(3): C7-C15.
- [6] Zeng H, Backus M. Interpretive advantages of 90° phase wavelets: Part 2: Seismic applications[J]. Geophysics, 2005, 70(3): C17-C24.
- [7] 卢异, 吴雪松, 石倩茹, 等. 薄互层地震响应及分频技术的适用性分析[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(4): 660-665.
LU Yi, WU Xuesong, SHI Qianru, et al. Applicability of seismic response to thin-interbed and acceptable condition of spectral decomposition[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(4): 660-665.
- [8] Coggins J. Thinner than expected? Don't blame the seismic[J]. The Leading Edge, 2011, 30(8): 858-860.
- [9] 黄文锋, 姚逢昌, 李宏兵. 薄互层调谐规律研究与净厚度估算[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(4): 584-591.
HUANG Wenfeng, YAO Fengchang, LI Hongbing. Regularities of tuning effects of thin interbedded layers and their net thickness determination[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(4): 584-591.
- [10] 徐伟慕, 郭平, 胡天跃. 薄互层调谐与分辨率分析[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(5): 750-757.
XU Weimu, GUO Ping, HU Tianyue. Thin interbed tuning and resolution analysis[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(5): 750-757.
- [11] Zeng H. How thin is a thin bed? An alternative perspective[J]. The Leading Edge, 2009, 28(10): 1192-1197.
- [12] 何建军, 刘天铎, 鲁新便, 等. 基于模型正演的地震属性分析技术识别和划分碳酸盐岩储层缝洞单元[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(4): 472-477.
HE Jianjun, LIU Jiaduo, LU Xinbian, et al. Recognition and delimitation of fracture and cave units of carbonate reservoir by using seismic attributes analytic technique based on forward model[J]. OGP, 2009, 44(4): 472-477.
- [13] 黄诚, 杨飞, 李鹏飞. 利用正演模拟识别各类地震假象[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(4): 493-496.
HUANG Cheng, YANG Fei, LI Pengfei. The use of forward modeling to identify various seismic illusions[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(4): 493-496.
- [14] 高红灿, 郑荣才, 陈发亮, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组层序地层[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(6): 839-850.
GAO Hongcan, ZHENG Rongcai, CHEN Faliang, et al. Sequence stratigraphy of the Paleogene Shahejie Formation in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(6): 839-850.
- [15] 赵良金, 杨广林, 王瑞飞, 等. 东濮凹陷裂缝性砂岩油气藏主控因素及成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 196-202.
ZHAO Liangjin, YANG Guanglin, WANG Ruifei, et al. Key controlling factors and reservoir-forming model of the

- fractured sandstone reservoirs in Dongpu Sag[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(2): 196-202.
- [16] 邓帅奇. 全空间弹性波场数值模拟与逆时偏移成像方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2012.
- [17] 牟永光, 裴正林. 三维复杂介质地震数值模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 14-33.
- [18] 李宗杰. 正演模拟验证叠前弹性阻抗反演在碳酸盐储层预测中的应用[J]. *石油物探*, 2013, 52(3): 323-328.
LI Zongjie. The application of forward-modeling-verified prestack elastic inversion in the prediction of carbonate reservoir [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2013, 52(3): 323-328.
- [19] 盛俭, 万鲁河, 温智虹, 等. 长白山天池火山泥石流数值模拟[J]. *重庆大学学报*, 2013, 36(2): 85-90.
SHENG Jian, WAN Luhe, WEN Zhihong, et al. Numerical simulation of lahar in Changbai Mountain region[J]. *Journal of Chongqing University*, 2013, 36(2): 85-90.
- [20] 李国发, 王艳仓, 熊金良, 等. 地震波阻抗反演实验分析[J]. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(45): 868-872.
LI Guofa, WANG Yancang, XIONG Jinliang, et al. Experimental analysis on seismic impedance inversion[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(45): 868-872.

(编辑 郑 洁)

~~~~~  
(上接第 112 页)

- [14] 马东民, 张遂安, 王鹏刚, 等. 煤层气解吸的温度效应[J]. *煤田地质与勘探*, 2011, 29(1): 20-23.  
MA Dongmin, ZHANG Suian, WANG Penggang, et al. Mechanism of coalbed methane desorption at different temperatures[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2011, 39(1): 20-24.
- [15] 杨新乐, 张永利, 李成全, 等. 考虑温度影响下煤层气解吸渗流规律试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(12): 1811-1814.  
YANG Xinle, ZHANG Yongli, LI Chengquan, et al. Experimental study of desorption and seepage rules of coal-bed gas considering temperature conditions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(12): 1811 - 1814.
- [16] 王轶波, 李红涛, 齐黎明. 低温条件下煤体瓦斯解吸规律研究[J]. *中国煤炭*, 2011, 37(5): 103-104.  
WANG Yibo, LI Hongtao, QI Liming. Study on gas desorption law of coal mass at low temperatures[J]. *China Coal*, 2011, 37(5): 103-107.

(编辑 郑 洁)