

叠前地震反演在清水地区砂砾岩优质储层预测中的应用

陈 昌

(中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院, 辽宁盘锦 124010)

摘 要: 辽河拗陷清水地区沙一段广泛发育了扇三角洲砂砾岩沉积,与同期沉积的暗色泥岩形成了良好的生储盖组合,是寻找岩性油气藏的有利地区。沙一段主要储层为含砾砂岩、细砂岩,受含灰质成分影响,含灰泥岩、含灰粉砂岩等非储层与储层的波阻抗相互重叠,利用常规叠后波阻抗反演无法准确预测优质储层。基于岩石物理分析,指出 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 为识别优质储层的敏感弹性参数。在叠前道集优化处理和横波预测的基础上,通过叠前地震反演得到 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$,对扇三角洲砂砾岩优质储层的分布特征进行了预测,为清水地区砂砾岩岩性油气藏勘探提供了依据。

关键词: 砂砾岩;优质储层;岩石物理;叠前反演;清水地区

中图分类号: P315;P313.1

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2017.06009

清水地区位于辽河拗陷西部凹陷南部,区内包含了辽河拗陷内最大的生油气洼陷—清水洼陷^[1,2]。古近纪沙一沉积时期(沙一段),研究区在东侧大洼断层剧烈活动的控制下,拉张沉陷形成深水湖盆。来自于东侧的物源以短轴形式倾入湖盆中心,形成扇三角洲—湖泊沉积体系。在古地貌的控制下,大规模砂体沿扇三角洲水下分流河道沉积,向前缘及侧缘尖灭,并被湖相泥岩包围,形成良好的生储盖配置关系,成为岩性油气藏发育的有利场所^[3-5]。2010年钻探的 w111 井在沙一段三层试油均获得成功,证实了研究区岩性油气藏存在较大的勘探潜力。据 w111 井等钻井资料揭示,沙一段纵向上为 350~500 m 的砂、泥岩互层。储层主要为含砾砂岩和细砂岩,储集空

间以原生粒间孔为主,孔隙度值域为 11%~18%,渗透率值域为 $(3\sim64)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,属于中低孔、低渗储层。沙一段同时还发育了泥岩、粉砂岩、泥质粉砂岩等细粒沉积物,属于非储层。受沉积环境影响,泥岩、粉砂岩等非储层普遍含有灰质成分,形成含灰泥岩、含灰粉砂岩^[6]。通过岩石物理分析,含灰泥岩、含灰粉砂岩与砂岩的波阻抗相互重叠,无法区分。以往研究区储层预测以叠后波阻抗反演为主,波阻抗无法准确区分砂岩储层与含灰岩类非储层,导致了砂砾岩优质储层预测的失误,制约了该区岩性油气藏的进一步发现。

近年来,叠前地震反演技术已被广泛应用于复杂油气藏的储层预测和油气检测^[7-10]。叠前地震道集数据中包含了振幅随偏移距或入射角变化的信息,Zoeppritz 方程表明这种变化与地下岩性和孔隙流体性质密切相关^[11-13]。通过叠前地震反演获得泊松比(σ)、纵横波速度比(V_p/V_s)、 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 等多种弹性参数,可以有效地避免波阻抗单一属性相互重叠的问题,进而提高复杂岩性预测和含油气性预测的准确度。本文从岩石物理出发,

收稿日期: 2017-03-20

基金项目: 国家油气重大专项“渤海湾盆地精细勘探关键技术”(2011ZX05006);中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目《富油凹陷的形成与前景预测》(2013D-0708)

作者简介: 陈 昌(1986—),男,硕士,工程师,主要从事油气预探部署工作。E-mail:37828499@qq.com

通过泊松比(σ)、 $\lambda\rho$ 、 $\mu\rho$ 等多种弹性属性交会分析,指出 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 为识别沙一段砂砾岩优质储层的敏感弹性参数,在叠前道集优化处理和横波预测的基础上,通过叠前地震反演得到 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$,利用该属性有效地预测了沙一段砂砾岩优质储层的分布特征,取得了较好的应用效果。

1 基本原理

叠前地震反演技术的理论基础是 Zoeppritz 方程,由于 Zoeppritz 方程解析表达式十分复杂,很难直接分析介质参数对振幅系数的影响,不便直接进行反演,必须对其简化。Fatii^[14]、Shuey^[15]、Aki 和 Richard 等^[16]地球物理学家推导了 Zoeppritz 方程的近似表达式。如果地层分界面两侧介质弹性性质的变化小,则在某一时间 t 时,水平界面的纵波反射系数可用 Aki-Richard 的线性近似表达式来定义:

$$R_{pp}(\theta) \approx \frac{1}{2} \sec^2 \theta \frac{\Delta V_p}{V_p} - 4 \sin^2 \theta \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 \frac{\Delta V_s}{V_s} + \frac{1}{2} \left[1 - 4 \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 \sin^2 \theta \right] \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1)$$

式中: θ 为纵波入射角和透射角的平均值;

V_p 、 V_s 、 ρ 分别为反射界面两侧介质的纵波速度、横波速度和密度的平均值;

ΔV_p 、 ΔV_s 和 $\Delta \rho$ 是界面两侧 V_p 、 V_s 、 ρ 的差。

通过求解方程(1)可反演得到纵波速度 V_p 、横波速度 V_s 、密度 ρ 3 个弹性参数。通过这 3 个参数,根据下面的方程(2)、(3)可以求得纵波阻抗 Z_p 与横波阻抗 Z_s ^[17]:

$$\text{纵波阻抗: } Z_p = V_p \rho \quad (2)$$

$$\text{横波阻抗: } Z_s = V_s \rho \quad (3)$$

根据弹性模量和阻抗之间的关系,可以得到下面的 2 个公式^[18]:

$$\lambda\rho = Z_p^2 - 2Z_s^2 \quad (4)$$

$$\mu\rho = Z_s^2 \quad (5)$$

将纵波阻抗 Z_p 与横波阻抗 Z_s 带入公式(4)、(5),可以求得 2 个弹性参数 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 。

2 敏感弹性参数分析

敏感弹性参数分析是叠前地震反演之前的前期试验工作^[19-21],对叠前地震反演的可行性分析

具有重要意义。针对沙一段岩性特征,使用直方图和交会图分析方法优选出对含砾砂岩、细砂岩等储层敏感的弹性参数。波阻抗直方图表明(图 1),含灰泥岩与细砂岩的波阻抗差异很小,重叠范围大,难以区分,因此利用常规的叠后波阻抗反演无法准确识别优质储层。

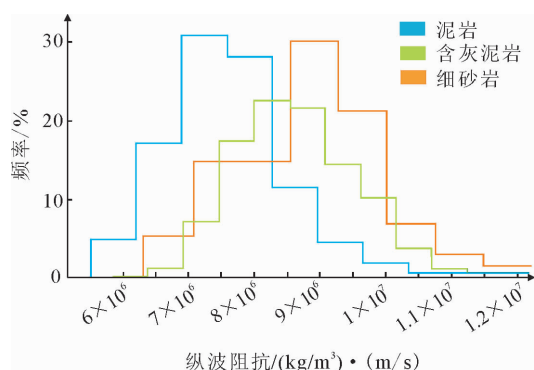


图 1 沙一段岩性波阻抗直方图

Fig. 1 lithological wave impedance distribution histogram of E_{s1}

将 w111、w113、s241 等井的阵列声波测井纵波速度 V_p 、横波速度 V_s 、密度 ρ 资料转换得到纵波阻抗 Z_p 、横波阻抗 Z_s 、泊松比 σ 、 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 等弹性参数。通过弹性参数交会分析表明(图 2),细砂岩和含砾细砂岩(细砂岩类)的特征为:高 $\mu\rho$ 、低 σ 和低 V_p/V_s ;含灰岩类的特征为:中等 $\mu\rho$ 、中等 σ 和中等 V_p/V_s ;泥岩类的特征为:低 $\mu\rho$ 、低 Z_p 、高 σ 和高 V_p/V_s 。细砂岩类的 $\mu\rho$ 值明显高于含灰岩类和泥岩类,利用 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 交会能够有效区分岩性,识别优质储层。

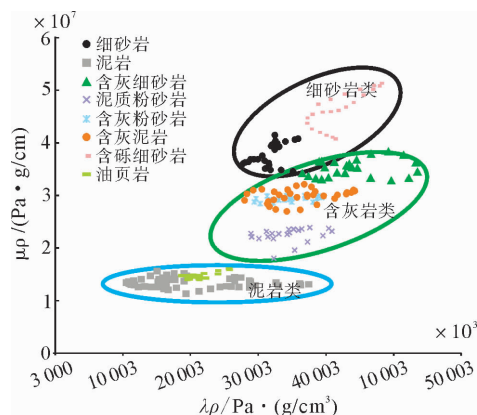


图 2 沙一段弹性参数交会图

Fig. 2 Crossplots of elastic parameters

3 叠前地震反演关键环节处理

根据砂砾岩优质储层敏感弹性参数分析结果,本次研究思路(图 3)是在层序地层和沉积体系单元内,以岩石物理分析为基础,以叠前 CRP 地震道集和地质、测井等信息为约束,开展叠前地震反演获得纵、横波阻抗及密度数据体,进而求取 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 等优质储层敏感弹性参数,实现对沙一段砂砾岩优质储层分布特征的预测。

3.1 叠前角道集预处理

叠前反演是基于叠前角道集及分角度叠加数据体完成,因此叠前角道集的预处理及其质量改善是影响反演结果的重要环节^[22]。以单井 AVO 正演道集为质量控制标准,对该区角道集采取了随机噪音压制、非地表一致性剩余静校正等优化处理方法,以改善道集质量。图 4 为优化前后角道集剖面,可以看到经过叠前预处理,角道集的信噪比明显提高,道集远端不平现象得到有效改善,道集 AVO 特征明显。

3.2 测井横波速度估算

纵波、横波速度是连接岩石物理性质与地震反射信息的桥梁^[23],准确的纵横波速度资料是叠

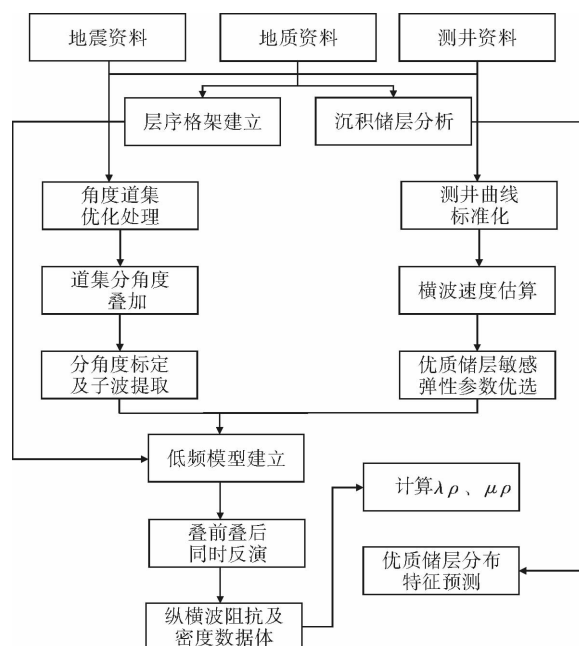


图 3 砂砾岩优质储层预测流程

Fig. 3 Prediction flow chart for High-quality Glutenite Reservoirs

前地震反演的基础。由于清水地区绝大多数井缺乏横波测井资料,因此采用岩石物理模型的方法来估算横波速度。清水地区沙一段主要为砂、泥岩的碎屑岩沉积,因此采用了适用于碎屑岩的 Xu-White 模型法^[24]进行横波速度预测。图 5 为

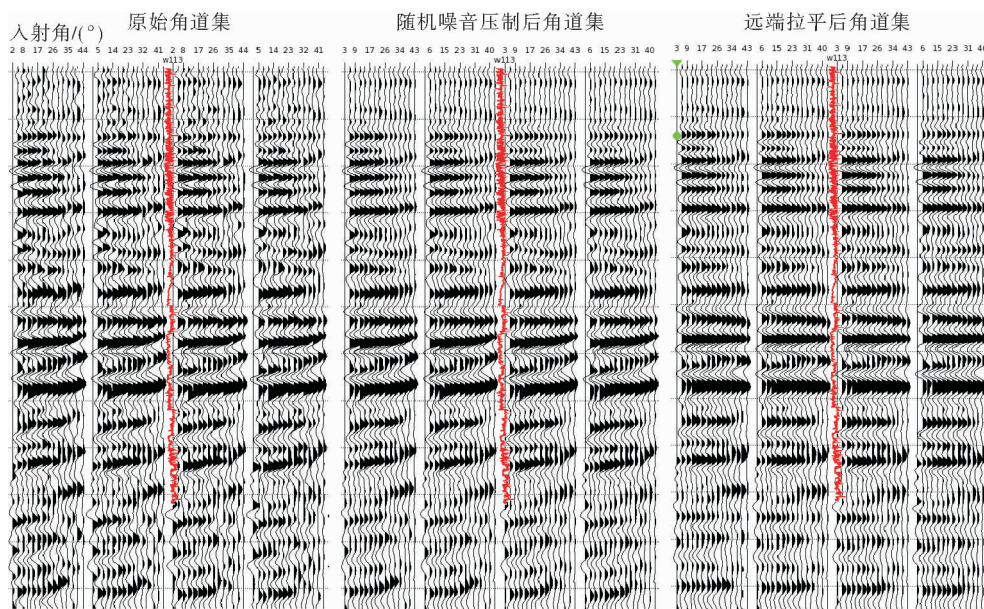
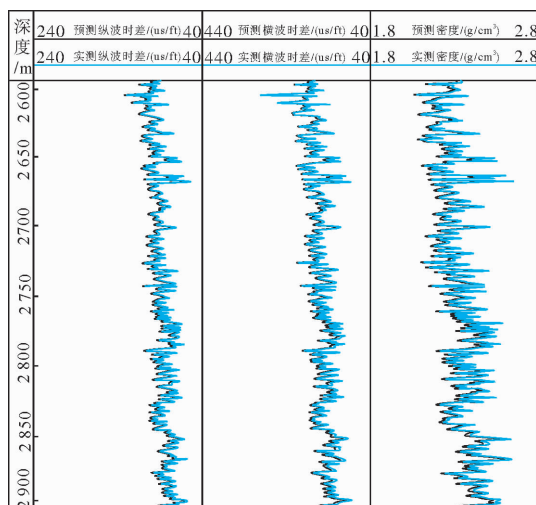


图 4 原始角道集与优化处理角道集对比

Fig. 4 Angle gathers before and after processing

s213井横波预测结果,其中,红色曲线为预测结果,蓝色曲线为实测值,可以看出预测的纵波、横波、密度曲线与实测曲线吻合程度较高,误差率 $<10\%$ 。



(红色为预测曲线,蓝色为实测曲线)

图5 s213井横波时差预测与实测值对比

Fig. 5 Measured and predicted shear-wave velocity of Well s213

4 砂砾岩优质储层预测效果

4.1 叠前地震反演效果

利用预测的横波速度与实测的纵波速度、密度曲线建立低频模型,同时将优化处理后的地震道集分3个角度范围进行部分叠加。在此基础上,利用Aki-Richard方程进行叠前反演,得到纵波阻抗 Z_p 、横波阻抗 Z_s 、泊松比 σ 、 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 等弹性参数。

图6为s229-w111井叠前反演 $\mu\rho$ 剖面,图7为s229-w111井叠后反演波阻抗剖面。钻探结果表明s229井在沙一下段仅钻遇了一套细砂岩储层,并试油获得高产油气流。通过剖面对比, $\mu\rho$ 剖面准确地预测了该套含油细砂岩,且在其余井段均为低 $\mu\rho$ 的特征,即预测为非储层。波阻抗剖面虽然也预测了该套含油细砂岩,但剖面中含灰粉砂岩和含灰泥岩同样为高波阻抗,与细砂岩相当,预测存在误区。表明叠前地震反演更适用于清水地区的砂砾岩储层预测。

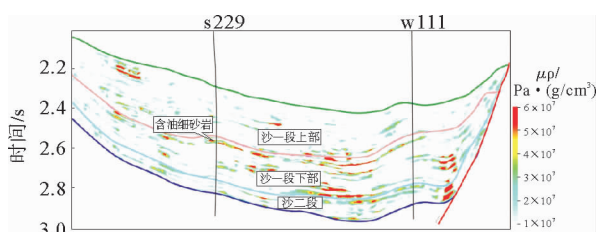


图6 s229-w111井叠前 $\mu\rho$ 反演剖面

Fig. 6 s229-w111 pre-stack inversion $\mu\rho$ section

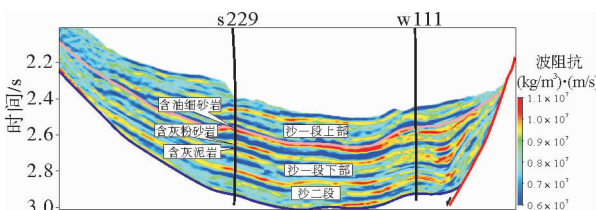


图7 s229-w111井叠后波阻抗反演剖面

Fig. 7 s229-w111 post-stack inversion wave impedance section

4.2 砂砾岩优质储层分布预测

在单井优质储层预测的基础上,在全区开展叠前反演,利用反演得到的 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 参数进行交会,并提取平面属性,对清水地区沙一段优质储层的平面分布特征进行描述。

图8为利用弹性属性交会提取的沙一段优质储层厚度图,通过与钻井结果对比,可以看出:s229、s246、w111井在沙一段均预测了厚度大于50m的优质储层,与实际钻探结果吻合,3口井

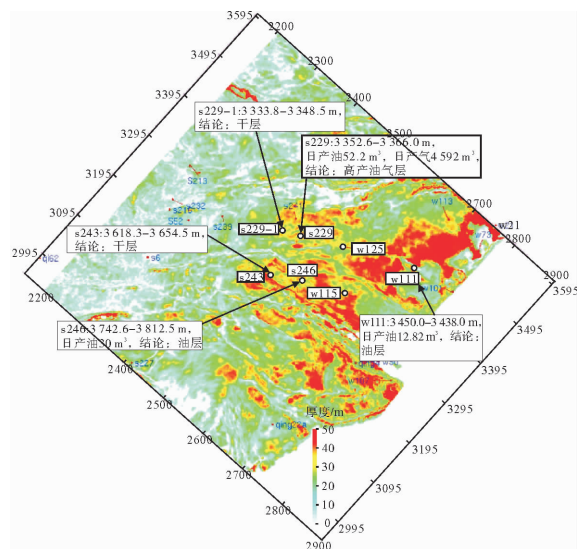


图8 沙一段优质储层预测厚度平面图

Fig. 8 Thickness prediction for high quality reservoir of Es1

在沙一段均已获得工业油气流。s229-1、s243 井均位于预测的薄层区,实际钻探结果为两口井钻遇的主要岩性为泥岩和含灰泥质粉砂岩,并未钻遇优质储层,试油结论为干层,叠前反演较为准确地预测了优质储层。

储层平面分布特征表明:沙一段优质储层分布范围主要集中在洼陷的北部 w111 块和 s229 块,沙一段扇三角洲的物源方向在洼陷东侧,来自于东侧的砂体在断层的控制下,在湖盆中心洼陷区展开并广泛沉积。地质研究表明洼陷中心暗色泥岩厚度最大(1 600 m)、生油能力最强,这些优质生油岩与优质储层形成了良好的生、储、盖配置关系,因此成为了岩性油气藏形成的有利场所。

根据本次叠前弹性参数反演预测结果,在清水地区东北部部署了 w115、w125 井,这两口探井均准确地钻遇了预测的优质储层,试油均获得工业油气流,钻探结果进一步证明了叠前地震反演在该区储层预测中的准确性。

5 结论

(1)清水地区沙一段岩性复杂,细砂岩等优质储层与含灰泥岩等非储层的波阻抗值差异小,叠后波阻抗反演无法区分。通过岩石物理分析、岩性敏感弹性参数优选,指出 $\lambda\rho$ 和 $\mu\rho$ 交会能够有效区分细砂岩类与含灰岩类、泥岩类,为识别优质储层的有效弹性参数。

(2)保幅保真地震资料是开展叠前反演的基础,针对本区叠前 CRP 道集资料存在的道集不平等问题,采用非地表一致性剩余静校正等方法有效地改善了道集资料品质,为叠前反演提供了资料保障。

(3)根据本次叠前地震反演的预测结果,清水地区沙一段优质储层分布范围主要集中在洼陷北部的 w111 块和 s229 块,在预测的有效储层厚度中心部署两口探井,均准确地钻遇了预测的优质储层,证明了叠前地震反演在本区储层预测中的准确性,也为本区岩性油气藏勘探提供了有利的依据。

参考文献:

[1] 肖 毅,王红亮,邓宏文,等. 辽河清水洼陷东营组高分辨

率层序格架下沉积演化特征及有利区带预测[J]. 沉积学报, 2008,26(6):1014-1020.

[2] 郭永强,刘洛夫. 辽河西部凹陷沙三段岩性油气藏主控因素研究[J]. 岩性油气藏, 2009,21(2):19-23.

[3] 田文元,李晓光,宁松华,等. 辽河西部凹陷南部古近系沉积物源研究[J]. 特种油气藏, 2010,17(1):45-48.

[4] 肖 雄,许晓宏. 辽河 CYT 油田 C9 块沙一段储层特征研究[J]. 石油地球物理勘探, 2013,48 (增刊 1):186-190.

[5] 孙洪斌,张凤莲. 辽河坳陷古近系构造-沉积演化特征[J]. 岩性油气藏, 2008,20(2):60-65.

[6] 韩小峰. 辽河油田欢双地区沙一、二段层序地层及沉积相研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2008.

[7] 高 云,朱应科,赵 华,等. 叠前同时反演技术在砂砾岩体有效储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2013,52(2):223-228.

[8] 周水生,宜 伟,郝召兵,等. 基于叠前反演的流体敏感属性实验研究及应用[J]. 地球物理学报, 2012,55(6):1985-1992.

[9] 王 伟,张 欣,崔晓朵,等. 叠前反演追踪砂体技术的应用——以平湖油田花港组为例[J]. 岩性油气藏, 2010,22(s1):69-73.

[10] 管路平. 地震叠前反演与直接烃类指示的探讨[J]. 石油物探, 2008, 47(3):228-234.

[11] 陈双全,王尚旭,张永刚,等. 应用叠前反演弹性参数进行储层预测(英文)[J]. 应用地球物理:英文版, 2009,6(4):349-358.

[12] 黄伟传,杨长春,王彦飞. 利用叠前地震数据预测裂缝储层的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2007,22(5):1602-1606.

[13] 郭晓龙,欧阳永林,陈海东,等. 叠前地震反演技术在苏里格地区的应用[J]. 天然气地球科学, 2008,19(6):840-843.

[14] Fatti J L. Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A 3-D seismic case history using the Geostack technique[J]. Geophysics, 1994, 59(59): 1362-1376.

[15] Shuey R T. A simplification of the Zoeppritz equations [J]. Geophysics, 1985, 50(50): 609-614.

[16] Aki K, Richards P G. Quantitative seismology, theory and methods I[J]. Earth-Science Reviews, 1980, 17(3): 296-297.

[17] 王大兴,于 波,张盟勃,等. 地震叠前分析技术在子洲气田的研究与应用[J]. 岩性油气藏, 2008,20(1):95-100.

[18] 范兴燕,郑俊茂,张延玲,等. 叠前反演技术在利比亚 K&k 区块油气检测中的应用[J]. 石油天然气学报, 2011,33(2):74-77.

[19] 杨士明,周丽梅,潘晓慧. 叠前弹性参数反演技术在识别白云岩储层中的应用[J]. 石油天然气学报, 2012,34(5): 69-73.

- [20] 刘力辉, 杨 晓, 丁 燕, 等. 基于岩性预测的 CRP 道集优化处理[J]. 石油物探, 2013, 52(5): 482-488.
- [21] 李凌高, 甘利灯, 杜文辉, 等. 叠前地震反演在苏里格气田储层识别和含气性检测中的应用[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(2): 261-265.
- [22] 刘晓鹏, 欧阳诚, 彭 宇, 等. 岩石物理参数分析在苏 59 区块的应用[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(4): 80-84.
- [23] 冯昕鹏, 李金付, 聂建委, 等. 横波速度拟合技术在苏里格气田的应用[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(6): 106-109.
- [24] 白俊雨, 宋志翔, 苏 凌, 等. 基于 Xu-White 模型横波速度预测的误差分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 589-595.

APPLICATION OF PRE-STACK SEISMIC INVERSION TO PREDICTION OF HIGH-QUALITY GLUTENITE RESERVOIRS IN QINGSHUI DISTRICT

CHEN Chang

(Exploration and Development Institute of Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin 124010, Liaoning, China)

Abstract: In the Qingshui district of the Liaohe Depression, the 1st Member of the Shahejie Formation was widely deposited as a fan-delta glutenite. The glutenite, together with syn-deposited dark shale, forms good source-reservoir -cap systems for lithologic reservoirs. The main reservoirs of the 1st Member of the Shahejie Formation are made up by pebbly fine sandstone. However, due to the existence of carbonate cement, wave impedance of non-reservoirs, such as limy shale and limy siltstone, is hard to be distinguished from that of the reservoirs. That is to say, high-quality reservoirs can not be predicted precisely by conventional stacked impedance inversion. Petrophysical analysis suggests that $\lambda\rho$ and $\mu\rho$ are good elastic parameters for recognition of high-quality reservoirs. Based on the optimizing process of pre-stack gathers and transverse wave prediction, $\lambda\rho$ and $\mu\rho$ have been obtained by pre-stack seismic inversion and used to predict the distribution pattern of high-quality fan-delta glutenite reservoirs to promote exploration in the glutenite lithologic reservoir in the Qingshui district.

Key words: glutenite; high-quality reservoir; petrophysics; pre-stack inversion; Qingshui area