doi: 10.11720/wtyht.2023.1580

史全党, 孔令业, 吴超, 等. 基于小波边缘分析与井—震联合建模的波阻抗反演技术在陆梁隆起带储层预测中的应用[J]. 物探与化探, 2023, 47 (6):1425-1432. http://doi.org/10.11720/wtyht. 2023.1580

Shi Q D, Kong L Y, Wu C, et al. Application of wave impedance inversion technology based on wavelet edge analysis and combined well-seismic modeling in reservoir prediction of Luliang uplift zone[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6):1425–1432. http://doi.org/10.11720/wtyht. 2023. 1580

基于小波边缘分析与井—震联合建模的波阻抗反演 技术在陆梁隆起带储层预测中的应用

史全党1,孔令业1,吴超1,丁艳雪1,刘泽民1,于雪1,王江2

(1. 中国石油新疆油田公司采气一厂,新疆 克拉玛依 834000;2. 中国石油大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院,黑龙江 大庆 163712)

摘要:针对准噶尔盆地陆梁隆起断裂构造复杂、储层横向非均质性强、含气砂体小而薄预测难的问题,应用小波边缘分析与井—震联合建模的波阻抗反演技术,从地震记录中直接提取反映构造和岩性变化的地震属性特征参数,与测井声波阻抗数据一起建立初始模型并参与波阻抗模型的扰动修改。此反演技术弥补了井间插值建模过程中井间高频成分的缺失和井间岩性的局部变化细节,避免了常规波阻抗反演过程中由于初始模型不准确而产生的错误信息,提高了地震资料识别"小而薄"砂体的分辨能力。结果表明:受东部克拉美丽山物源控制,在陆梁隆起带DX14 井区梧桐沟组形成扇三角洲—半深湖(深湖)沉积体系;发育一系列扇三角洲前缘砂体。实际钻井结果与钻前预测对比表明,井点处预测砂岩厚度的绝对误差小于0.60 m,相对均方误差小于2.84%,预测精度满足精细储层预测要求。研究成果可为精细油藏描述和井位部署提供依据。

0 引言

随着含油气盆地精细构造解释、精细储层预测 和精细油藏描述工作的深入,对地震资料分辨率的 需求越来越高^[1-4],精细储层预测的手段也一直以 地震波阻抗反演为主^[5-8]。根据目标区的构造背 景、沉积环境制定合理的技术对策和利用波阻抗反 演方法来减小波阻抗反演结果的多解性、提高储层 预测能力一直是地震波阻抗反演和储层精细预测的 攻关方向^[9-10]。姚逢昌等^[11]通过对基于模型的波 阻抗反演方法进行分析,认为多解性是基于测井约 束性框架模型波阻抗反演方法所固有的特性,取决 于初始模型和实际地下构造特点、沉积特征的符合 程度。现有的测井约束波阻抗反演方法由于各自不 同的方法原理,均存在一定局限性^[12-13],地震高频 分量主要依赖于初始波阻抗模型从测井曲线中获 取,初始建模主要是在解释层位控制下的井间插值, 没有考虑断层在初始建模中的作用,横向上也没有 充分利用地震信息。当目标区构造条件复杂、断层 发育、沉积环境和岩性横向变化较大时,利用钻井数 据井间插值或外推得到的初始模型低频背景较好, 而反映岩性横向井间局部变化的高频成分获取较 难,距离插值井点越远,产生的误差越大,减小了波 阻抗反演方法对初始模型高频成分的应用程度,降 低了波阻抗反演储层预测精度。

基于小波边缘分析与建模的波阻抗反演(acoustic impedance inversion based on wavelet edge analysis and modelling)技术(简称 AIW),利用小波边 缘分析方法从地震记录中直接提取地震属性特征参

收稿日期: 2022-12-16; 修回日期: 2023-09-08

基金项目:国家重大科技专项"大型油气田及煤层气开发"(2011ZX05001-001-004)

第一作者:吴超(1991-),男,高级工程师,主要从事油田勘探及油藏评价工作。Email:wuchao12@ petrochina.com.cn

通讯作者:王江(1966-),男,博士,高级工程师,主要从事地震勘探数据处理、解释方法技术研究工作。Email:wangjiaang@petrochina.com.cn

数,在断层参与的高密度层控构造框架约束下,同测 井声波阻抗数据一起建立初始模型,相互约束、相互 补充,充分利用地震数据横向分辨率高、纵向控制层 位密度大的优势,避免了常规波阻抗反演过程中初 始模型建立不准而产生的地质影响。许崇宝等^[14]、 崔永福等^[15]、谢裕江等^[16]应用 AIW 波阻抗反演技 术对准东煤田和新疆红沙泉区块侏罗系西山窑组含 煤地层的煤层厚度、塔里木盆地英买力地区志留系 沥青砂岩以及中国 MOU 气田盒 8 段河流相心滩砂 岩进行了预测,弥补了常规波阻抗反演建模过程中 井间高频成分缺失,提高了储层反演精度,但应用的 区块大多构造简单、地层横向变化不大,很少针对构 造复杂、断裂发育、沉积环境多变的断陷盆地以及低 分辨率、低信噪比目标区进行研究。

本文应用小波边缘分析与井—震联合建模的波 阻抗反演技术,考虑准噶尔盆地陆梁隆起带 3D 地 震的波组反射特性以及地下地震波场的分布特点, 通过小波边缘分析提取反映岩性局部变化的地震特 征参数,在断层参与的高密度层控构造框架约束下, 参与初始模型的建立和波阻抗的反演迭代,确定波 阻抗反演的关键环节、优化克拉美丽气田 DX14 井 区储层预测流程,不但精细刻画了克拉美丽气田 DX14 井区扇三角洲前缘砂体的分布,也提高了有 利储层的预测精度。

1 区域地质概况

克拉美丽气田位于准噶尔盆地陆梁隆起东南部 的滴南凸起中段,滴南凸起整体为一大型西倾的鼻 状构造,受准噶尔盆地多期的构造建造和改造影响, 断裂发育、构造复杂。滴南凸起中段是准噶尔盆地 腹部最早展开勘探的地区之一,至今已发现了石炭 系、二叠系、侏罗系和白垩系多个油气藏,其中二叠 系梧桐沟组油气藏埋深3500~4000m,而且构造破 碎、断裂发育,多发育为断层控制的小断块和小断鼻 构造,气藏类型主要为构造—岩性气藏。主要含油 气层为梧桐沟组一段,岩性为细砂岩和粉砂岩,储集 空间类型主要为剩余粒间孔及粒内溶孔。根据电性 及储层特征,自下而上可划分为两段(P₃wt,、 P_3wt_1),油层主要发育在 P_3wt_1 ,砂岩储层不但低孔、 特低渗、非均质性强,而且储层横向连续性差,纵向 变化大,使得滴南凸起中段 DX14 井区的地震资料 不但构造成像效果差、分辨率低,而且砂体的地震响 应特征不明显。

通过滴南凸起中段 DX14 井区原始地震资料分

析,在目的层段梧桐沟组存在弱—空白以及低分辨 率的地震反射,地震资料主频为 30 Hz,如果地层平 均速度按 3 900 m/s 计算,滴南凸起中段 DX14 井区 3D 地震资料可识别砂体的最小厚度为 32.5 m,而 滴西 DX14 井区含气砂体厚度一般为 2.0~15 m,所 以常规地震资料的分辨能力是无法满足精细构造解 释和精细储层预测的地质需求,因此,应在精细井— 震一体化初始模型建立的基础上开展高精度的波阻 抗反演和精细储层预测。

2 技术方法

2.1 多尺度小波边缘分析与地震特征参数建模

小波边缘分析是一个理想的地震特征参数提取 方法,利用小波边缘分析从地震数据本身提取地震 特征参数得到地震数据局部的变化信息,通过地震 数据的小波变换函数的一阶微分极大值和二阶微分 零值进行处理,对处理后的梯度点进行判断,确定其 为边缘点。

对地震数据 d 进行小波变换得到 $W_{s}(d)$,计算 公式为

$$W_{s}(d) = \frac{1}{s} \int_{-1}^{1} b\psi(\frac{t-x}{s}) \, \mathrm{d}x \quad , \qquad (1)$$

对式(1)两侧求偏导,且令

$$\frac{\partial W_{s}(d)}{\partial t} = 0 \quad , \tag{2}$$

$$\frac{\partial^2 W_{\rm s}(d)}{\partial t^2} = 0 \quad , \tag{3}$$

式中:d 为地震数据; $W_s(d)$ 为地震数据的小波变换; s 为小波尺度;x 为平移量,s; ψ 为母小波函数;t 为 时间,s;b 为时间延迟 x 秒的地震数据,小波尺度 s控制小波函数的伸缩,平移量 x 控制小波函数的平 移。

联合式(1)、式(2)、式(3),求解此方程组,可得 到地震记录中不同尺度、不同级别的地震特征参数 边缘点(断层和岩性体的边缘)。

这样,通过小波变换把地震信号分解为多个不同尺度的分量,利用其良好的局部时频分辨力提取不同精度、不同奇异度的边缘点,最后连接起来就形成综合边缘。提取的地震特征参数的边缘点不但反映了原始剖面中不易识别的地质特征和地下岩性纵、横向的局部变化,将综合边缘点控制的地震特征参数同测井曲线一起参与波阻抗反演建模,克服了井间插值反演建模过程中无法充分利用地震信息的不足,获取了反映岩性横向井间局部变化的高频成

分,从而也补充了波阻抗反演过程中高、低频地震分量。

2.2 AIW 波阻抗反演算法

AIW 波阻抗反演采用非线性全局优化的非常 快速模拟退火法(VFSA)作为基本反演方法,该算 法通过模型反复扰动修改不但可以避免线性反演算 法强烈依赖初始模型而落入局部极值的弊端,且可 以高精度求得反演问题的全局最优解^[17],使得 AIW 波阻抗反演结果与地下地质情况更加符合,其算法 如下:

1) 将归一化相似系数定义为 AIW 波阻抗反演的目标函数 $E^{[18]}$,来计算初始框架模型 g_0 的目标函数值 $E(g_0)$,计算公式为

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i} (a_i - \bar{a}_i) (a'_i - \bar{a}'_i)}{\left[\sum_{i=1}^{i} (a_i - \bar{a}_i)^2\right]^{1/2} \left[\sum_{i=1}^{i} (a'_i - \bar{a}'_i)^2\right]^{1/2}}, (4)$$

式中: E 为目标函数值; a_i、ā_i为实际地震道的相对 振幅和平均相对振幅, a'_i、ā'_i为合成地震道的相对 振幅和平均相对振幅。

2)联合地震特征参数和测井数据一起来约束 模型扰动中的模型变量的变化区间[A_i, B_i],修改初 始模型 g_0 获取新模型 g,并根据关系式(4)计算新 模型 g 的目标函数值 E(g)以及新模型目标函数 E(g)与当前模型目标函数 $E(g_0)$ 差 ΔE,即 Δ $E = E(g) - E(g_0)$ 。

3) 当 $\Delta E < 0$ 时,确定新模型 g 为最终的初始模型,如果确定了新模型 g,置 $g_0 = g, E(g_0) = E(g)$ 。

4) 当 $\Delta E > 0$,则按依赖于温度的似 Cauchy 分布 产生新模型,计算公式为:

$$g'_{i} = g_{i} + y_{i}(B_{i} - A_{i})$$
, (5)

 $y_i = T_{\text{sgn}}(u - 0.5) [(1 + 1/T)^{|2u-1|} - 1], (6)$ 式中: g'_i 为修改后的第 i 模型, $g'_i \in [A_i, B_i]; g_i$ 为 当前的第 i 模型, $g_i \in [A_i, B_i]; y_i$ 为扰动因子; T 为 温度, K; sgn 为符号函数; u 为均匀分布的随机量, 且 $u \in [0,1]_{\circ}$

5)同一温度下,多次重复步骤 3)和 4),缓慢降低温度,重复步骤 3)~5),直至收敛条件 $\Delta E < 0$,反复迭代反演,获取高精度的 AIW 波阻抗反演数据体。

2.3 AIW 波阻抗反演的关键环节

AIW 波阻抗反演的关键在于利用小波边缘分 析方法从地震记录中直接提取地震属性特征参数, 由于提取的地震属性特征参数不但反映地下岩性横 向局部变化,而且直接参与了波阻抗反演过程中初 始模型的建立和反复迭代反演,弥补了井间插值建 模过程中井间高频成分的缺失和井间岩性的局部变 化,避免了常规波阻抗反演过程中初始模型建立不 准确而产生的影响。主要关键环节为:

1)利用测井和地震资料开展井震精细对比,确 定不同波组的地质表征,通过纵向细划地层对比单 元、横向精细对比,对三维地震资料开展精细的构造 解释,得到精细的构造和沉积格架,联合测井曲线建 立波阻抗低频模型;

2)通过小波边缘分析提取反映地下岩性横向局部变化的地震属性特征参数,结合精细标定的测井曲线以及应用解释层位、解释断层和测井曲线建立的波阻抗低频模型重新建立新的AIW 波阻抗模型,进一步获取波阻抗高、低频成分;

3)提取的地震属性特征参数同钻井声波测井 曲线中速度或声波阻抗数据一起进行模型扰动和修 改,利用非线性全局优化的非常快速模拟退火法,反 复迭代反演,获取高精度的 AIW 波阻抗反演数据 体。

3 应用实例

3.1 井--震精细标定与储层敏感性分析

为了建立精细的波阻抗反演初始框架模型,以 DX14 井区梧桐沟组一段上、下分布的两套含气砂 层为对比标志,对 DX14 井区梧桐沟组地层进行纵 向细分、横向精细对比,划小纵向地层对比单元。根 据地层旋回、地震层序特征,基于井-震精细标定技 术进一步将梧桐沟组一段纵向细划了3个十米级地 层层序旋回的砂组($P_3wt_1^1$ 、 $P_3wt_1^2$ 、 $P_3wt_1^3$),其上部的 $P_{2}wt_{1}^{1}$, $P_{2}wt_{1}^{2}$ 砂组是 DX14 井区梧桐沟组的主力含 气层。从地层纵向细化、横向精细对比出发,以石炭 系顶界不整合界面为地震资料时间—深度转换的标 准层,在地震剖面上精细标定各砂组位置,以砂组 为单元开展精细构造追踪、解释。梧桐沟组沉积时 期,受东部克拉美丽山物源控制,在DX14 井区发育 一系列扇三角洲前缘砂体,扇三角洲前缘砂体具有 高阻、低伽马、较高波阻抗的特征,与上覆和下伏地 层具有较大的波阻抗差,表现为中强地震反射特征。

通过对 DX14 井区内所有钻井的测井资料进行 曲线重采样、去野值、归一化和标准化预处理,对 DX14 井区主要含气层段(P₃wt¹, P₃wt²)的测井曲线 响应进行砂、泥岩识别的敏感性分析,发现砂岩表现 为高电阻、低伽马、低声波和低密度的特征,利用波 阻抗、密度和电阻率等电性曲线无法区分含气层段 (P₃wt¹, P₃wt²)的砂、泥岩(图 1a)。为了精细刻画 DX14 井区砂岩分布,以声波曲线作为低频背景、自然伽马曲线作为高频成分重构拟声波曲线,来反演和预测梧桐沟组一段(P₃wt¹₁、P₃wt²₁)砂体的展布情况。经伽马拟声波测井曲线重构,DX14 井区梧桐



沟组一段($P_3wt_1^1$ 、 $P_3wt_1^2$)的砂岩均表现为高波阻抗特征,而泥岩则表现为低波阻抗特征,砂岩和泥岩能够很好地区分出来,砂、泥岩间波阻抗界限为6700 「(kg・m⁻³)・(m・s⁻¹)](图 1b)。



图 1 波阻抗重构前(a)、后(b)的电阻率与波阻抗交汇

Fig. 1 Intersection of resistivity and wave impedance before (a) and after (b) wave impedance reconstruction

3.2 构造框架模型

以往波阻抗反演的构造框架模型建立主要是依赖于地震解释的区域性组、段级标准反射层位,而很少应用一些层间的砂组和油层反射层位,同时也完全不考虑断层对反演结果的影响,在构造简单、地层横向变化不大的凹陷性盆地这种影响较小,但在构造复杂、断层发育、地层横向变化较大的断陷盆地就会产生相当大的影响:

1)由于断陷盆地地层横向变化,在大的区域性 标准反射层控下内插的井间测井信息就会发生构造 误差,为了减小内插测井信息的构造误差,开展层序 地层研究,纵向细化地层单元,开展砂组级层序对 比,以砂组级的地震反射层面来实现层控构造框架 建模,减小区域性标准反射层控下井间内插测井信 息发生的构造误差;

2)由于断陷盆地复杂的断裂结构,并间内插时 也没有考虑断层两侧内插测并数据的突变,不但影 响断层两侧的岩性接触关系,降低断层两侧波阻抗 反演精度,而且降低了波阻抗反演剖面对断层的识 别能力,为了解决这一问题,将断层转化为地震层 位,明确断层与纵向细化地层单元间的接触关系,同 地震反射层位一起控制测井信息的井间内插,克服 了断层两侧由于井间测井数据内插而引起的测井数 据、地震属性特征参数误差,实现了断层两侧内插测 井数据以及地震属性特征参数突变。

3.3 小波边缘分析

小波边缘分析具有多尺度分辨的特点,可以有 效地区分地震剖面中不同尺度、不同级别的地震特 征参数边缘点,利用小波边缘分析获取的地震特征 参数中的边缘点可以是断层、岩性体的边缘。

图 2 和图 3 分别为 DX14 井区三维 L1036 地震 剖面以及经小波边缘分析得到的地震特征参数边缘 检测特征点剖面。从图 3 可见,经过小波多尺度边 缘分析处理后,纵向地层有效分开,相邻道的不连续 性明显,微断裂的断点被突出、地层微小错动特征清 晰,反映的地层接触关系更准确,提取的地震特征参 数的边缘点可以反映原始剖面中不易识别的地质特 征,将边缘点控制的地震特征参数同测井曲线一起 参与波阻抗反演建模,不但补充了波阻抗高、低频成 分,而且把地层横向间的接触关系完全考虑在波阻 抗反演的整个过程中,并且在迭代过程中应用此参 数对其进行扰动限制,使 AIW 波阻抗反演模型反映 的地下地质情况更加真实,减少了波阻抗反演的多 解性。



图 2 DX14 井区三维 L1036 地震剖面

Fig. 2 L1036 seismic profile in DX14 well area



in DX14 well area

3.4 井--震一体化初始模型建立

在波阻抗反演框架模型的建立过程中,低频分量主要来源于两种途径:一是将测井数据中的高频成分滤去;二是直接应用地震处理的速度谱资料,目前大多数波阻抗反演的低频成分主要是滤去声波测井曲线中的高频成分获得。

同常规波阻抗反演不同,DX14 井区 AIW 波阻 抗反演初始模型建立过程中突出井—震一体化、构 造—岩性统一:

1)应用钻井拟声波测井曲线获得速度或者阻抗的低频成分,然后在断层参与的高密度层控构造框架控制下横向沿着纵向细化的层序界面外推。为了纵向细化低频模型,保证低频模型井间构造精度,纵向选择梧桐沟组一段3个砂组和梧桐沟组二段1个砂组的底界以及百口泉组底界5个地震反射层做为主要的控制层,当遇到断层时,按该断层转换后的层位与纵向细化的层序界面间的接触关系处理,断层上盘层序界面与断层关系按超覆处理,下盘层序界面与断层关系按剥蚀处理,建立准确的DX14井区AIW 波阻抗反演的低频阻抗模型。

2)通过井—震结合精细标定钻井有利储层和 纵向细化的层序界面,提取拟波阻抗曲线的低频阻 抗分量,在建立的断层参与的高密度层控构造框架 控制下内插和外推低频阻抗建立低频阻抗模型后, 根据 AIW 波阻抗反演基本原理,依据小波边缘分析 技术从经过拓频处理的提频三维地震资料中提取反 映岩性局部变化的地震属性特征参数,在断层参与 的高密度层控构造框架控制下,用小波边缘检测方 法得到的边缘信息结合测井沿层位外推的波阻抗来 估算反演的初始波阻抗模型,同拟声波阻抗的低频 阻抗模型一起建立 AIW 波阻抗反演的最终初始模 型,并且在迭代过程中应用此参数对其进行扰动限 制,会使反演结果收获意想不到的效果。

由于断层参与的高密度层控构造框架减小了层 间测井信息内插引起的层间构造误差、实现了断层 两侧内插测井数据的突变,通过井—震精细标定,依 据小波边缘分析技术从双向拓频地震数据中提取地 震属性特征参数不但补充了井间内插造成的高频成 分缺失,也加入了反映岩性变化信息的地震属性参 数,实现井—震一体化、构造—岩性统一的波阻抗反 演初始模型。

图 4 和图 5 分别为 DX14 井区 3D 地震 L1036 线测井声波阻抗内插外推得到的低频模型以及小波 边缘分析得到的地震属性特征参数联合测井声波阻 抗、构造框架建立的井—震统—的 AIW 波阻抗反演 模型。对比图 4 和图 5 可见, 井—震统一的 AIW 波 阻抗反演模型不但包含测井声波阻抗内插外推的低 频模型井间横向内插的低频成分, 同时也引入了反 映井间岩性变化的地震属性数据的小波边缘分析结 果, 在图 4 中, 由于井间声波阻抗横向连续内插, 无 法体现井间岩性的变化和地层间的叠置关系, 而在 井—震统一的 AIW 波阻抗反演模型图 5 中, 地层纵 向上岩性变化可以通过图 4 中的低频成分来区分, 而横向上岩性的变化、地层间接触关系以及断层、断 点则通过地震属性特征参数来表征, 同测井声波阻 抗内插外推的低频模型相比, 井—震统一的 AIW 波 阻抗反演模型更能反映地下的实际地质情况。



图 4 L1036 线测井阻抗低频模型





4 应用效果

在滴南凸起 DX14 井区,梧桐沟组一段是梧桐 沟组的主力含气层系,上部砂岩发育,储层较厚,下 部泥岩增多。梧桐沟组一段沉积时期,构造活动相 对增强,地貌高差构造变化较大,受东部克拉美丽山 物源控制,在 DX14 井区发育一系列扇三角洲前缘 砂体,砂体顶部和底部主要发育泥岩、粉砂质泥岩沉 积,储层结构具有典型的"泥包砂"特点,单层砂岩 厚度一般 2.0~7.0 m,前缘砂体累计厚度一般大于 为 5.0~18.0 m。应用 AIW 波阻抗反演方法,充分 考虑滴南凸起 DX14 井区复杂的构造特点、多变的 沉积环境形成的"小而薄"扇三角洲前缘砂体以及 三维地震资料波组反射特征、地下全方位地震波场 的分布特征与变化因素,依据小波边缘分析技术从 经过拓频处理的三维地震资料中提取反映岩性局部 变化的地震属性特征参数,在断层参与的高密度层 控构造框架控制的基础上同测井数据一起参与初始 模型建立,并反复迭代修改反演道的波阻抗模型,最 终得到滴南凸起 DX14 井区高精度的地震反演波阻 抗资料。

图 6 为 DX14 井区在同一个构造地质框架模型 基础上,分别采用 AIW 波阻抗反演和常规基于模型 波阻抗反演方法得到的过 DX14 井波阻抗反演剖 面,从图 6 可见,AIW 波阻抗反演剖面的分辨率高 于常规基于模型波阻抗反演结果和常规叠后地震剖 面,AIW 波阻抗反演结果反映的砂层间相互接触关 系不但清晰,而且明显反映出了地层岩相、岩性的横 向变化,地层岩性信息也更加丰富。通过过 DX14 井的波阻抗反演剖面也可以看出梧桐沟组一段的砂 体横向分布范围较小、不连续,呈现出扇三角洲前缘 砂体"小而薄"的特点,符合在 DX14 井区发育扇三角 洲前缘砂体的地质认识。纵向上准确预测了 DX14 井梧桐沟组一段发育的 5 套砂体,其中 3 532.00~ 3 536.00 m 井段厚度为 4.0 m 的 含气砂体 同 3 542.00~3 550.00 m 井段厚度为 8.0 m 的含油砂体 呈明显的叠置关系,而 3 522.00~3 524.00 m 井段厚 度为 2.0 m 的含气砂体、3 562.00~3 572.00 m 井段 厚度为 10.0 m 的含气砂体则呈现明显的透镜状砂 体,向上倾和下倾方向尖灭,反演结果并与实钻结果 高度吻合,而常规基于模型波阻抗反演结果不但储层 分辨率不高,而且无法反映砂体间的叠置关系。







model-based wave impedance inversion section

利用 AIW 波阻抗反演和常规基于模型波阻抗 反演结果,分别对梧桐沟组一段下砂组砂体顶、底界 面进行精细井震对比、追踪解释,构造成图,以梧桐 沟组一段下砂组顶、底地震反射界面为层段时窗界 限,按照砂岩和泥岩间波阻抗界限 6 700 [(kg・ m⁻³)・(m・s⁻¹)]预测砂体分布结果如图 7,从中可 见常规基于模型波阻抗反演资料分辨率较低,砂体 的地震响应特征不明显,砂体边界及岩性体间的关 系不清(图 7b)。而利用 AIW 波阻抗反演结果可以 明显看出:受东部克拉美丽山物源控制,在 DX14 井 区发育一系列扇三角洲前缘砂体,砂体与断裂相配 合在 DX14 井区形成断层—岩性和岩性油气藏(图 7a)。

目前 DX14 井区完成各类钻井 133 口,其中直 井 76 口,水平井 57 口,以砂岩和泥岩间波阻抗界限 6 700 [(kg・m⁻³)・(m・s⁻¹)]为标准对梧桐沟组 一段 P₃wt¹ 砂岩进行预测,通过与实钻砂岩厚度对 比,井点处预测砂岩厚度的绝对误差均小于 0.60 m,相对均误差小于 2.84%。近期完钻的 D408 井钻 前预测梧桐沟组一段 P₃wt¹ 砂岩厚度为 12.6 m,通 过 D408 井钻后对比,该井梧桐沟组一段 P₃wt² 实钻 砂岩厚度为12.1 m,绝对误差为0.5 m,证明AIW



图 7 DX14 井区梧桐沟组一段 P₃wt²₁ AIW 波阻抗反演(a) 与常规基于模型波阻抗反演(b) 波阻抗平面 Fig. 7 P₃wt²₁ AIW wave impedance inversion(a) and conventional model-based wave impedance inversion(b) wave impedance plan of the first member of Wutonggou Formation in DX14 well area

波阻抗反演结果的准确度较高,预测精度完全满足 精细储层预测、精细油藏描述和精细勘探开发的地 质需求。

5 结论

1)应用小波边缘分析技术建立的初始波阻抗 模型更加接近真实地下地质情况,提高了反演的真 实性,利用所得的特征点信息结合测井波阻抗对反 演的约束起到了很好的效果,为储层的研究提供了 指导作用。

2) AIW 波阻抗反演技术将测井波阻抗、地震特 征边缘信息作为约束条件建立的初始模型,弥补了 常规反演过程中缺少井间的局部构造、岩性变化的 地震信息,增加了波阻抗反演过程中高频成分,同常 规反演相比,AIW 波阻抗反演结果不但能够准确反 映井间岩性变化,而且更接近实际地质情况。

3)在断层参与的高密度层控构造框架控制下, 测井波阻抗和地震属性特征参数联合建模实现了 井—震一体化、构造—岩性统一,但应用的地震属性 特征参数比较单一,多属性联合建模仍是波阻抗反 演的研究方向。

4)利用基于小波边缘分析的井—震联合建模 AIW 波阻抗高反演方法,对准噶尔盆地陆梁隆起 DX14 井区梧桐沟组一段含气砂岩储层进行精细反 演和预测,刻画了扇三角洲前缘砂体,预测砂体厚度 的相对误差均小于 2.84%,预测精度高,完全适用 于准噶尔等复杂断陷盆地以及复杂目标区构造—岩 性等各种隐蔽性油气藏的精细储层预测和精细油藏 描述。

参考文献(References):

- [1] Li G F,Zhou H,Zhao C. Potential risks of spectrum whitening deconvolution—Compared with well-driven deconvolution[J]. Petroleum Science, 2009,6(2):146–152.
- [2] 王江,涂国田,王杰. 基于载波调制的高分辨率地震双向拓频 技术及其应用[J]. 石油物探,2021,60(6):954-963.
 Wang J,Tu G T, Wang J. High-resolution seismic bidirectional frequency extension based on carrier modulation [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2021,60(6):954-963.
- [3] 王华忠,盛燊.走向精确地震勘探的道路[J].石油物探,2021, 60(5):693-708,720.

Wang H Z, Sheng S. Pathway toward accurate seismic exploration [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(5):693-708,720.

[4] 纪永祯,张渝悦,朱立华,等.基于 SBL-WVD 的地震高分辨率 时频分析[J].石油物探,2020,59(1):80-86,107. Ji Y Z, Zhang Y Y, Zhu L H, et al. High-resolution seismic timefrequency analysis based on sparse Bayesian learning combined with Wigner-Ville distribution [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(1):80-86,107.

 [5] 肖张波, 雷永昌, 于骏清, 等. 基于宽频资料的扩展弹性阻抗反 演方法在陆丰 22 洼陷低勘探区古近系岩性预测中的应用
 [J]. 物探与化探, 2022, 46(2): 392-401.
 Xiao Z B, Lei Y C, Yu J Q, et al. Application of broadband data-

Alao Z B, Let T C, Tu J Q, et al. Application of bloadbald databased extended elastic impedance inversion method in Paleogene lithology prediction of areas at a low exploration level in Lufeng 22 subsag [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46 (2):392–401.

[6] 张德明,刘志刚,臧殿光,等. 基于叠前同时反演的致密砂岩储 层预测及含气性识别——以苏里格S区块为例[J].物探与化 探,2022,46(3):645-652.

Zhang D M, Liu Z G, Zang D G, et al. Prediction and identification of gas-bearing properties of tight sandstone reservoirs through simultaneous prestack inversion: A case study of block S in Sulige gas field[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3): 645-652.

- [7] 姜勇,秦德文,俞伟哲,等.东海某凹陷大型砂体优势储层预测 技术研究与应用[J].石油物探,2020,59(6):949-960.
 Jiang Y,Qin D W,Yu W Z,et al. Prediction of favorable reservoirs in large sandstone reservoirs in a sag of the East China Sea[J].
 Geophysical Prospecting for Petroleum,2020,59(6):949-960.
- [8] 杜向东.中国海上地震勘探技术新进展[J].石油物探,2018, 57(3):321-331.

Du X D. Progress of seismic exploration technology in offshore China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(3):321-331.

- [9] 宁宏晓,唐东磊,皮红梅,等.国内陆上"两宽一高"地震勘探技 术及发展[J].石油物探,2019,58(5):645-653.
 Ning H X,Tang D L,Pi H M, et al. The technology and development of "WBH" seismic exploration in land, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019,58(5):645-653.
- [10] 董世泰,张研. 成熟探区物探技术发展方向——以中石油成熟 探区为例[J]. 石油物探,2019,58(2):155-161,186.
 Dong S T,Zhang Y. Geophysical technical development direction of mature exploration areas: A case study from a mature exploration area of PetroChina [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019,58(2):155-161,186.
- [11] 姚逢昌,甘利灯. 地震反演的应用与限制[J]. 石油勘探与开发,2000,27(2):53-56.
 Yao F C, Gan L D. Application and restriction of seismic inversion
 [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(2):53-56.
- [12] 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(6):868-872.
 Li G F, Wang Y C, Xiong J L, et al. Experimental analysis on seismic wave impedance inversion [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010,45(6):868-872.
- [13] 刘海宁,韩宏伟,魏文,等. YD 高密度三维区沙四段灰岩有利 储层地震预测[J].物探与化探,2021,45(5):1281-1287.

Liu H N, Han H W, Wei W, et al. Seismic prediction of favorable limestone reservoirs in the fourth member of Shahejie Formation in YD high density 3D area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021,45(5):1281-1287.

- [14] 许崇宝,刘东源.小波边缘分析建模波阻抗反演方法在煤层解释中的应用[J].中国煤炭地质,2008,20(2):43-45.
 Xu C B,Liu D Y. Application of wavelet marginal analytical modeling wave impedance inversion in coal seam interpretation[J]. Coal Geology of China,2008,20(2):43-45.
- [15] 崔永福,彭更新,李国会,等. 基于小波边缘分析建模的波阻抗 反演技术[J]. 新疆石油地质,2009,30(2):261-263.
 Cui Y F, Peng G X, Li G H, et al. Acoustic impedance inversion based on wavelet edge analysis and modeling[J]. Xinjiang Petroleum Geology,2009,30(2):261-263.
- [16] 谢裕江,刘高.小波边缘分析与建模的波阻抗反演算法的改进——以中国 MOU 气田盒 8 段储层分布预测为例[J].浙江 大学学报:工学版,2013,47(9):1680-1684,1696.
 Xie Y J,Liu G. Algorithmic modification of acoustic impedance inversion based on wavelet edge analysis and modelling: a case of reservoir distribution prediction in h8 segment of MOU gas field, China[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2013,47(9):1680-1684,1696.
- [17] Ingber L. Very fast simulated re-annealing [J]. Mathematical and Computer Modelling, 1989, 12(8):967-973.
- [18] Huang X R, Chopra A, Yang C T. Wavelet sensitivity study on inversion using heuristic combinatorial algorithms [J]. Seg Technical Program Expanded Abstracts, 1995:1088-1090.

Application of wave impedance inversion technology based on wavelet edge analysis and combined well-seismic modeling in reservoir prediction of Luliang uplift zone

SHI Quan-Dang¹, KONG Ling-Ye¹, WU Chao¹, DING Yan-Xue¹, LIU Ze-Min¹, YU Xue¹, WANG Jiang²

(1. PetroChina Xinjiang Oilfield Company Gas Production Plant No. 1, Karamay 834000, China; 2. Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing 163712, China)

Abstract: The Luliang uplift zone in the Junggar Basin exhibits intricate fault structures, laterally heterogeneous reservoirs, and small-scale and thin gas-bearing sand bodies, presenting challenges in reservoir prediction. Hence, this study applied the wave impedance inversion technology based on wavelet edge analysis and well-seismic joint modeling to directly extract seismic attributes' characteristic parameters that reflect structural and lithological changes from seismic records. These seismic attribute characteristic parameters were used to build the initial model together with acoustic impedance logs and participated in disturbance modification of the wave impedance model. This inversion technology counteracted the lack of inter-well high-frequency components and the inter-well local lithologic changes during the inter-well interpolation modeling and avoided error information caused by the inaccurate initial model in the conventional wave impedance inversion, thus improving the resolution of seismic data in identifying small-scale and thin sand bodies. The results show that under the control of the provenance of the Kelameili Mountain in the east, a fan delta-semideep (deep) lacustrine sedimentary system formed in the Wutonggou Formation in the DX14 well area of the Luliang uplift zone, hosting many fan delta-front sand bodies. The comparison between the actual drilling results and the pre-drilling prediction results indicates that the absolute error and relative mean error of sandstone thickness prediction at the well site were less than 0. 60 m and less than 2. 84%, respectively, suggesting that the prediction accuracy meets the requirements of fine-scale reservoir prediction. The research results provide a guide for fine-scale reservoir description and well deployment.

Key words: wavelet edge analysis; well-seismic joint modeling; impedance inversion; reservoir prediction; seismic attribute characteristic parameter; DX14 well area; Luliang uplift zone

(本文编辑:叶佩)