

优选地震波形指示反演方法在薄互储层砂体预测应用

郝雨田 许晨航

西安石油大学地球科学与工程学院

DOI:10.12238/gmsm.v7i10.1977

[摘要] 北部湾盆地涠西南凹陷^[1]东南斜坡带流沙港组广泛发育薄互层砂体, 储层砂体厚度约为7~13m, 由于储层非均质性较强, 地震资料分辨率不足, 薄互层砂体预测难度较大。通过对研究区目标井段开展井震结合、分级对比的方法, 以高分辨率层序地层学原理^[2]为指导, 将“L2”划分为2个层序, 3个中期旋回和15个短期旋回。在短期旋回内进行地震波形指示反演及优选, 反演成果有效地识别了短期旋回内薄互层砂体的叠置关系及空间展布特征。目的层以薄砂体为主, 通过多种基于地震属性和反演方法分析, 认为高分辨率结合多种反演方法优选的反演手段是开展小层砂体预测的关键环节。

[关键词] 薄互储层; 地震反演; 砂体预测

中图分类号: P315 文献标识码: A

Application of the Optimized Seismic Waveform – Indicated Inversion Method in the Prediction of Thin Interbedded Reservoir Sand Bodies

Yutian Hao Chenhang Xu

School of Earth Sciences and Engineering Xi'an Shiyou University

[Abstract] The Liushagang Formation in the southeastern slope of the Weixinan Depression, Beibu Gulf Basin, is characterized by widespread development of thinly interbedded sand bodies. These reservoir sand bodies typically range from 7 to 13 m in thickness. Due to significant reservoir heterogeneity and insufficient seismic resolution, predicting these thinly interbedded sands is challenging. By integrating well logs with seismic data and employing a hierarchical correlation approach, guided by high-resolution sequence stratigraphy principles, “L2” was divided into two sequences, three medium-term cycles, and fifteen short-term cycles. Within these short-term cycles, seismic waveform-based inversion and optimization techniques were applied. The resulting inversion effectively delineated the stacking patterns and spatial distribution of the thinly interbedded sands within the short-term cycles. The target interval is dominated by thin sand bodies. Through a combination of seismic attribute analysis and various inversion methods, it is concluded that high-resolution seismic data combined with optimized inversion techniques are crucial for accurate prediction of thin-layered sand bodies.

[Key words] Thin-Bedded Reservoirs; Seismic Inversion; Sandbody Prediction

引言

近年来, 由于岩性油气藏复杂的成藏机理和精细的储层展布特征, 岩性油气藏的勘探面临着诸多挑战。在层序格架内更好的利用地震资料识别薄互储层砂体是制约勘探突破的关键难题之一。薄互储层通常具有厚度薄、横向变化快、岩性非均质性强等特点, 使得传统地震勘探方法难以有效识别, 严重制约了油气资源的有效开发。因此, 如何利用地震技术高精度识别薄互储层砂体, 已成为当前油气勘探领域的重要研究方向。针对薄互储层识别的难题, 国内外学者开展了大量的研究工作, 已经提出了多种有效的技术方法。一些学者已经通过调谐理论、地震反演、提高地震资料分辨率等手段, 力求更准

确地刻画薄储层。其中, 时频分析方法被用于提高薄层预测能力; 基于分频谱和调谐频率的反演技术也被提出; 地质统计学反演方法被应用于薄层砂体的预测; 地层切片技术被用于利用地震资料的横向分辨率进行薄层预测; 多属性融合方法也被尝试用于薄层砂体预测, 并取得了一定的效果。然而, 这些方法在实际应用中仍存在一定的局限性。本文以北部湾盆地涠西南凹陷下的流二段薄互储层为研究对象, 在吸收前人研究成果的基础上, 基于压缩感知的数据提频技术, 通过对原始地震数据分析, 优选波形与高分辨率联合反演, 基本实现了有效识别薄互储层。

1 地质背景

北部湾盆地主要位于中国南海北部湾地区,是中国海上重要的富油盆地之一。该盆地地处华南板块西南缘,为新生代陆内裂谷盆地,形状近似菱形,总面积约为 $3.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。北部湾盆地被企西隆起、流沙港低凸起以及徐闻隆起分割成隆凹相间的构造格局。目前发现的油气田主要发现于涠西南凹陷、乌石凹陷和福山凹陷。研究区(图1)位于北部湾盆地北部坳陷带的涠西南凹陷。主要发育长流组、流沙港组、涠洲组等湖相地层,其中流沙港组二段沉积时期发育中深湖相烃源岩;在新近系裂后热沉积阶段,海水侵入,主要发育下洋组、角尾组、望楼港组、灯楼角组等海相地层。根据区域沉积演化特征,可将涠西南凹陷自下而上分为6套储盖组合。

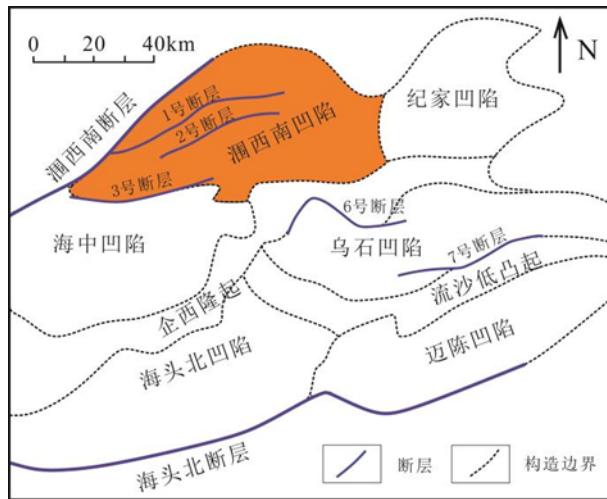


图1 研究区区域位置图

2 原始地震数据分析

研究区地震资料频带宽度约为 $8\text{--}58\text{Hz}$,主频约为 30Hz ,且纵向分辨率低,对储层、隔夹层的识别能力弱。现有的地震资料几乎无法分辨两个短期旋回 $L_2\text{IIa}$ 与 $L_2\text{IIc}$ 之间的短期旋回 $L_2\text{Ib}$,且各短期旋回之间几乎无法识别。针对目的层系薄互层为主的储层特征,开展提高分辨率优化处理。从提频前的频宽 $10\text{--}60\text{Hz}$,主频 26Hz ;提频至频宽 $8\text{--}78\text{Hz}$,主频 38Hz 。提频前后对比如图(图2)。

3 储层反演方法优选

高分辨率拓频处理的关键环节是压缩地震子波,获取反射系数。谱反演是通过谱分解与非线性反演方法使频率域目标函数达到极小反演出反射系数、薄层厚度。理论上,谱反演在没有噪音和地震子波已知的情况下,可识别薄层,精确地反演出反射系数值。在层厚小于调谐厚度时,振幅和频率仍然在连续变化,能恢复有效频带外的频率信息,亦即谱反演理论。

3.1 薄层反演拓频技术原理

本文主要采用了薄层反演拓频处理^[3]技术,主要包括两部分:首先是迭代正则化处理,然后是薄层反演高频恢复处理,最终使得频带拓宽、弱信号能量增强。Tikhonov正则化方法^[4]是最具普适性、理论完备而且行之有效的,它是由前苏联科学家Tikhonov在1977年提出来的,其主旨思想是通过引入正则化项

将不适定问题转化为近似的适定问题来求解。目前正则化方法已经在如图像重建、岩土物理力学参数反演、卫星探测等方面得到了成功应用。对于不适定问题考虑算子方程 $Ax = y$, 其中 $x \in X$, $y \in Y$, y 一般情况下为实际测量值, A 为无穷维 Hilbert 空间 X 到 Y 的线性算子。当不具有唯一解或其解与 y 不具有一对一对应关系时, 该方程表述的就是不适定问题。Tikhonov 正则化方法通过引入正则化约束项求解最小化问题:

$$\min_{x \in X} \{ \|Ax - y\|_2^2 + \lambda \|Lx\|_2^2 \} \quad (1)$$

来获得正则逼近解 x 。其中正则化参数 λ ($\lambda \geq 0$) 控制着残差的范数第一项与第二项之间的相对大小。当 λ 为 0 的时候, 上述最小化问题的解即为最小二乘解, 当 λ 为无限大的时候, 方程是无解的。因此需要选择合适的 λ 值, 使得方程既能求解, 而且其解还能满足精度要求和稳定性要求。

薄层反演:

众所周知, 地震反射记录 $s(t)$ 可表示为地震子波 $w(t)$ 与

地层反射系数 $r(t)$ 的褶积运算结果, 如式(2):

$$s(t) = w(t) * r(t) + n(t) = \sum_{\tau=0}^{\infty} w(\tau)r(t-\tau) + n(t) \quad (2)$$

式中 $n(t)$ 为噪音成分。在式(2)中, 地震记录为实际观测数据, 而方程右侧地震子波、地层反射系数、噪音成分均为未知项。很明显, 反射系数项 $r(t)$ 的求解问题是一种典型的反演问题和不适定问题。

反褶积是最常用的求解方法, 即人为给定一个子波或者子波数组, 利用付氏逆变换运算就可以直接求出反射系数序列, 但存在的问题也很明显, 那就是地震子波给定较为任意, 不符合实际地质情况, 由此导致求解结果与实际偏差较大, 因此通常对反褶积方法的使用较为慎重。模型反演方法为地球物理问题求解的主要手段, 如常用的稀疏脉冲反演, 速度较快, 但获得的结果分辨率与原数据完全一样, 信噪比有所降低。

Puryear 等基于楔形模型分辨率研究, 提出薄层反射系数反演^[5]方法。对于一个薄层, 给定其顶界面反射系数 r_1 , 底界面反射系数 r_2 , 在时间域薄层脉冲响应可表示为:

$$g(t) = r_1 \delta(t - t_1) + r_2 \delta(t - t_1 - T) \quad (3)$$

式中 t_1 为波到达顶界面旅行时, T 为薄层时间厚度。将其转换到频率域, 上式变为:

$$G(f) = r_1 \exp(-i2\pi f t_1) + r_2 \exp(-i2\pi f (t_1 + T)) \quad (4)$$

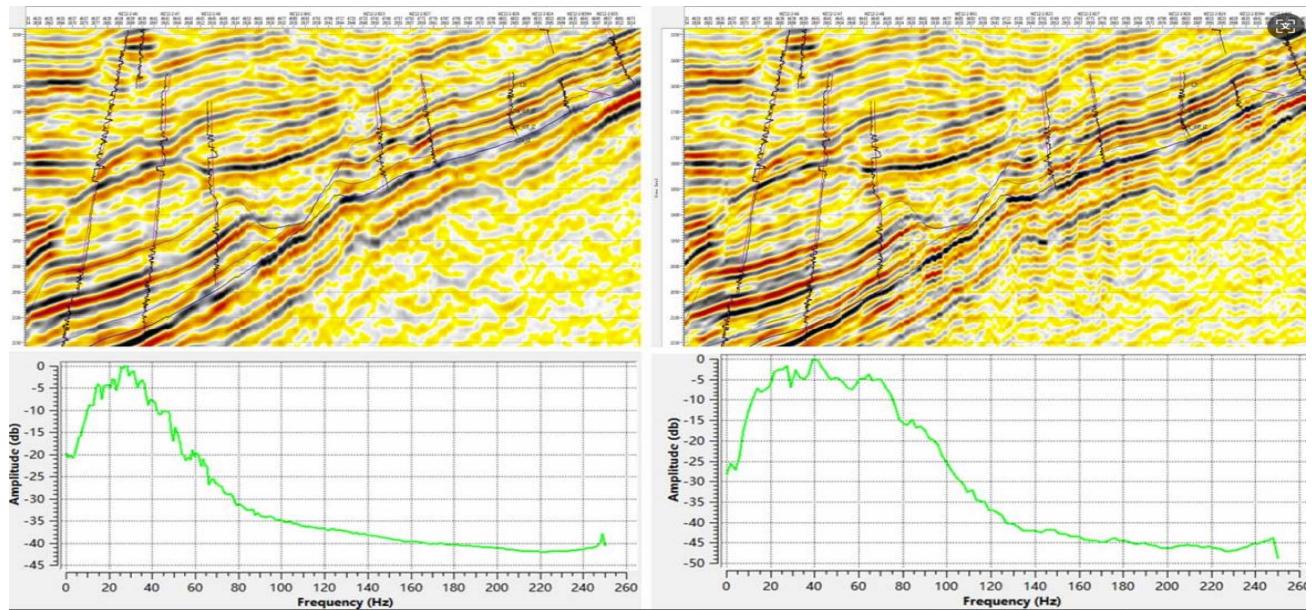


图 2 地震剖面提频前后对比图

表 1 研究预测与实测砂厚误差表

| 井名 | 层位 | 实测砂厚 | 预测砂厚 | 实际误差 | 相对误差 | 井名 | 层位 | 实测砂厚 | 预测砂厚 | 实际误差 | 相对误差 |
|--------|--------------------|------|------|-------|--------|-------|--------------------|------|------|-------|--------|
| 11-6Sa | L ₂ IIa | 6.6 | 7.0 | 0.40 | 6.1% | A8 | L ₂ IIa | 9.3 | 10.0 | 0.70 | 7.5% |
| 11-7 | L ₂ IIa | 4.7 | 5.0 | 0.30 | 6.4% | A9 | L ₂ IIa | 15.2 | 16.0 | 0.80 | 5.3% |
| 2-2 | L ₂ IIa | 9.8 | 12.0 | 2.20 | 22.4% | B22 | L ₂ IIa | 9.6 | 10.0 | 0.40 | 4.2% |
| A10 | L ₂ IIa | 18.2 | 17.0 | -1.20 | -6.6% | B23 | L ₂ IIa | 17.8 | 19.0 | 1.20 | 6.7% |
| A10S1 | L ₂ IIa | 21.4 | 22.0 | 0.60 | 2.8% | B24 | L ₂ IIa | 10.1 | 11.0 | 0.90 | 8.9% |
| A11S1 | L ₂ IIa | 10.1 | 12.0 | 1.90 | 18.8% | B25 | L ₂ IIa | 13.3 | 15.0 | 1.70 | 12.8% |
| A12 | L ₂ IIa | 16.9 | 20.0 | 3.10 | 18.3% | B26 | L ₂ IIa | 15.4 | 16.0 | 0.60 | 3.9% |
| A13 | L ₂ IIa | 7.4 | 8.0 | 0.60 | 8.1% | B27 | L ₂ IIa | 13.7 | 16.0 | 2.30 | 16.8% |
| A14 | L ₂ IIa | 14.6 | 16.0 | 1.40 | 9.6% | B29S1 | L ₂ IIa | 22.0 | 23.0 | 1.00 | 4.5% |
| A15 | L ₂ IIa | 7.8 | 8.0 | 0.20 | 2.6% | B30 | L ₂ IIa | 8.8 | 8.0 | -0.80 | -9.1% |
| A18 | L ₂ IIa | 7.6 | 8.0 | 0.40 | 5.3% | B32 | L ₂ IIa | 16.9 | 16.0 | -0.90 | -5.3% |
| A19 | L ₂ IIa | 8.7 | 7.9 | -0.80 | -9.2% | B33 | L ₂ IIa | 17.4 | 16.0 | -1.40 | -8.0% |
| A20 | L ₂ IIa | 11.8 | 12.0 | 0.20 | 1.7% | B34 | L ₂ IIa | 13.5 | 11.0 | -2.50 | -18.5% |
| A21 | L ₂ IIa | 11.2 | 12.0 | 0.80 | 7.1% | B35 | L ₂ IIa | 8.8 | 10.0 | 1.20 | 13.6% |
| A23 | L ₂ IIa | 8.6 | 10.5 | 1.90 | 22.1% | B36 | L ₂ IIa | 7.4 | 8.0 | 0.60 | 8.1% |
| A24 | L ₂ IIa | 14.9 | 13.0 | -1.90 | -12.8% | B37 | L ₂ IIa | 10.9 | 11.0 | 0.10 | 0.9% |
| A5 | L ₂ IIa | 14.4 | 14.0 | -0.40 | -2.8% | B40 | L ₂ IIa | 16.3 | 17.0 | 0.70 | 4.3% |
| A6 | L ₂ IIa | 12.6 | 15.0 | 2.40 | 19.0% | B41 | L ₂ IIa | 14.7 | 16.0 | 1.30 | 8.8% |
| A7 | L ₂ IIa | 8.9 | 10.0 | 1.10 | 12.4% | B45 | L ₂ IIa | 9.2 | 10.0 | 0.80 | 8.7% |

由于薄层脉冲响应可分解为奇、偶两部分响应的组合, 上式实部 $\text{Re}[G(f)]$ 即与偶部响应 r_e 相关, 虚部 $\text{Im}[G(f)]$ 则与奇部响应 r_o 有关。由此反射系数 $r(t)$ 可以被分解为多个薄层奇、偶两部分信号的加权组合, 即:

$$r(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (a_{n,m} r_e(t, n, m, \Delta t) + b_{n,m} r_o(t, n, m, \Delta t)) \quad (5)$$

其中 $r_e(t, n, m, \Delta t) = \delta(t - m\Delta t) + \delta(t - m\Delta t + n\Delta t)$,

为第 m 个薄层、厚度为 $n\Delta t$ 时偶部信号反射系数;

$r_o(t, n, m, \Delta t) = \delta(t - m\Delta t) - \delta(t - m\Delta t + n\Delta t)$ 为第 m

个薄层、厚度为 $n\Delta t$ 时奇部信号反射系数。式中 n, m 为样点数, N 、

M 为计算时窗内最大样点数, Δt 为采样间隔, $a_{n, m}$ 、 $b_{n, m}$ 为

相应的系数。

利用子波 w 与 $r(t)$ 进行褶积运算, 得到:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (w^* a_{n, m} r_e(t, n, m, \Delta t) + w^* b_{n, m} r_o$$

$$(t, n, m, \Delta t)) \quad (6)$$

由式(6)可以看出, 地震反射记录可以分解为一系列薄层奇部模型脉冲响应与偶部模型脉冲响应的组合, 权值系数 $a_{n, m}$ 、 $b_{n, m}$ 为关键值。由此可以利用 δ 脉冲函数建立一个薄层楔形模型, 并分解为奇部和偶部, 然后利用地震子波与其分别褶积形成初始模型。这里的子波采用Porsani等建议的方法从实际地震数据中提取, 形成计算时窗内的地震子波矩阵数组。然后变换到Hilbert空间, 计算复数谱极大值, 并采用迭代正则化方法构造稳定泛函, 求解最小化问题:

$$\text{Min} J_2(R, \alpha) = \text{Min} \{ \| \text{real}(WR) - S \|^2_2 + \alpha \| L(R) \|^2_2 \} \quad (7)$$

式中: S 为实际地震道数据, W 为子波矩阵, R 为反射系数模型, α 为规则化参数, $L(R)$ 为约束条件。式(7)中方程右侧第一项为最小二乘模型, 用于求取实际地震道与模型正演结果之间的误差总方差极小值, 也称为拟合误差, 第二项为施加的正则项。若正则化参数选择适当, 问题(7)具有稳定解并可以收敛到约束条件下的最佳近似解。采用稀疏脉冲条件约束并经过不断修正迭代计算, 当 J 达到极小值时获得最佳近似解, 计算出权值系数 $a_{n, m}$ 、 $b_{n, m}$ 。最后将奇部和偶部脉冲反射系数进行加权组合即获得最终的反射系数解。

3.2 常规波阻抗反演

常规波阻抗反演^[6] (图3) 分辨率较低, 储层预测效果较差, 不能有效识别薄互储层。

3.3 甜点反演

通过原始地震剖面与甜点反演剖面经过对比(图4), 甜点反演仍分辨率较低, 储层及砂体预测效果较差。

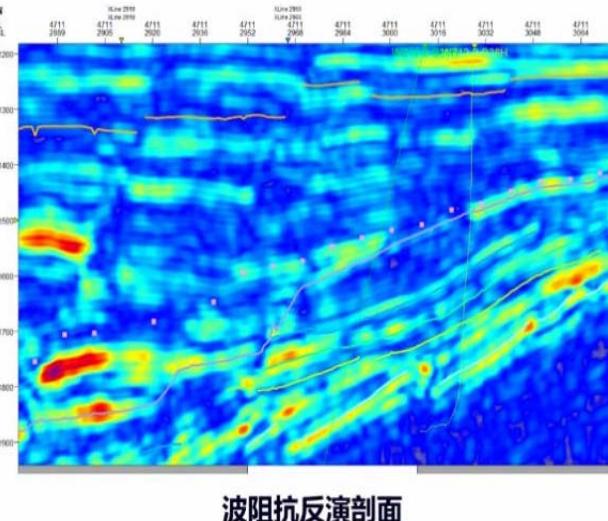
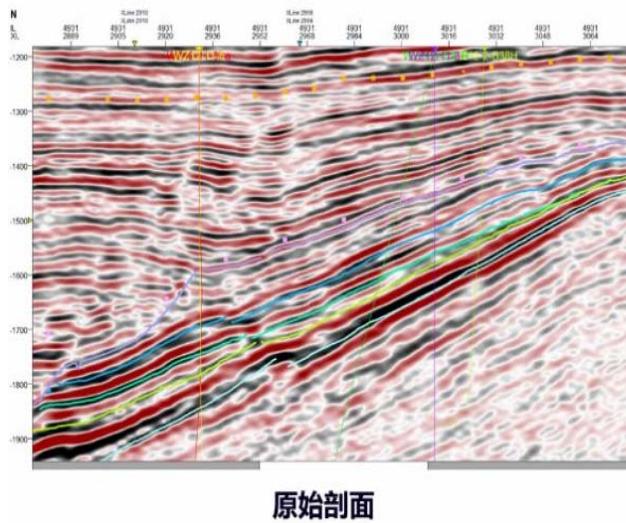
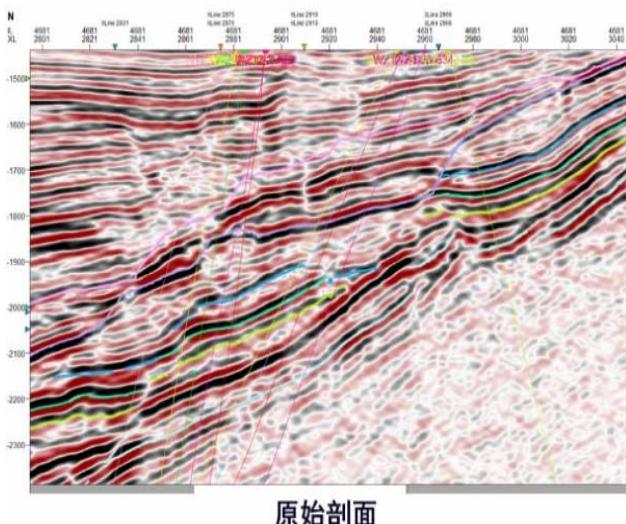


图3 常规波阻抗反演对比



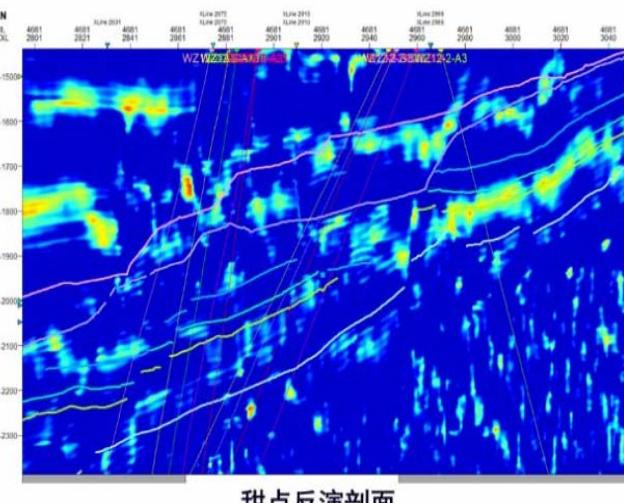


图4 甜点反演对比

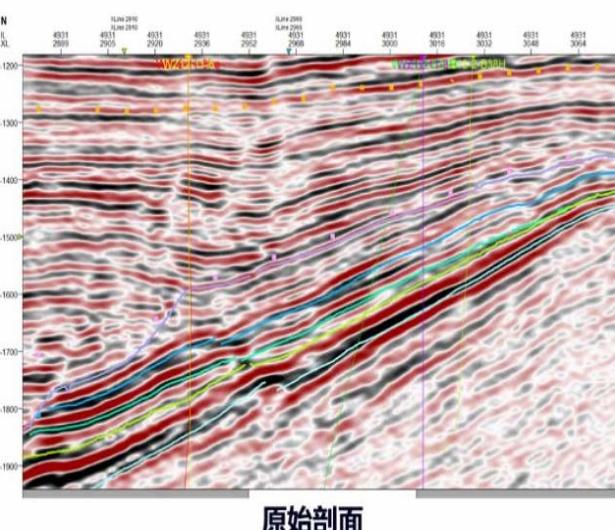


图5 等频滤波+波阻抗反演对比

3.4 等频滤波+波阻抗反演

等频滤波加波阻抗反演(图5)的组合方法比常规波阻抗反演以及甜点反演效果能看出有显著的改善,但其分辨率仍然较低,对砂体预测效果仍较差。

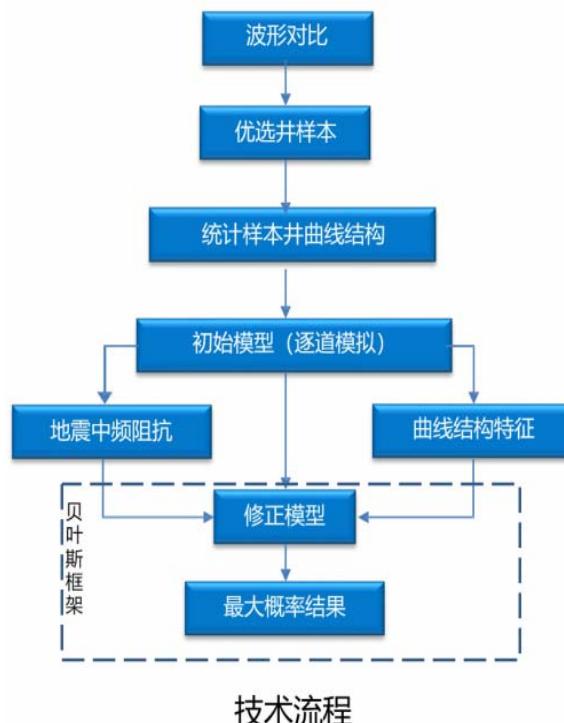


图6 地震波形指示反演流程图

3.5 优选地震波形指示反演

波形指示反演采用“地震波形驱动^[7]的结构化统计表征”方法,利用波形横向变化表征储层空间结构的变异性。对原始地震波形数据进行对比,确定低频井和地震频带,优选较合理的井样本并进行结构化模拟,接着逐步确定所选井低频段的波形指示,并对井高频段进行随机模拟。以上,初始反演模型或经过多次模拟并修正后,得到最大概率结果,流程图如图(图6)。

3.6 地震波形指示反演成果

目的层以薄互层砂体为主,整体预测实际误差 $\leq 3m$,相对误差 $\leq 23\%$;预测与实测砂体厚度对比如下表(表1)所示。

4 结语

针对目的层系薄互层为主的储层特征,结合前人研究成果,应用地震、测井等多方面资料分析,开展提高分辨率优化处理,提频后能够有效识别薄互储层;

通过多种反演方法并优选更有效方法进行分析,基于提频地震数据波形指示的反演方法取得了较好效果,能有效预测目标层位砂体情况。

参考文献

- [1] 董贵能,李俊良.北部湾盆地涠西南凹陷流一段非构造油气藏[J].石油勘探与开发,2010,37(05):552-560.

[2]胡荣强.高分辨率层序地层学研究现状及发展趋势[J].西部探矿工程,2019,31(04):81–82+86.

[3]张益,魏峰,查玉强,等.地震拓频技术在涠洲6-12油田薄储层刻画中的应用[J].西安石油大学学报(自然科学版),2023,38(02):25–34.

[4]郭淑妹,李豪,郭杰.一种新Tikhonov正则化方法[J].西南师范大学学报(自然科学版),2018,43(06):46–51.

[5]张倩,彭真明,江阳,等.薄层反射系数反演中的影响因素分析及应用[C]//中国地球物理学会,全国岩石学与地球动力学研讨会组委会,中国地质学会构造地质学与地球动力学专业委员会,中国地质学会区域地质与成矿专业委员会.2015中国地球科学联合学术年会论文集(十四)——专题40油气田与煤田地球物理勘探.电子科技大学光电信息学院,2015:5.

[6]冉喜阳.基于分频与拓频技术的波阻抗反演[D].成都理工大学,2019.

[7]何文渊,裴明波.基于地震波形驱动层序格架建立及页岩岩相特征研究——以松辽盆地古龙页岩油5号试验区为例[J].中国石油勘探,2024,29(02):123–133.

作者简介:

郝雨田(1998--),男,汉族,河南省郑州市人,西安石油大学在读硕士研究生,专业方向: 矿物学,岩石学,矿床学,研究方向: 油藏精细描述。

许晨航(1999--),男,汉族,河南省郑州市人,西安石油大学在读硕士研究生,专业方向: 矿物学、岩石学、矿床学,研究方向: 非常规油气。