

超薄砂岩储层预测方法研究与应用

——以厄瓜多尔安第斯14和17区块为例

王光付¹,徐海¹,李发有¹,孙建芳¹,段文龙²

[1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京102206;2. 中国石油大学(北京)地球物理学院,北京102249]

摘要:目前在油气勘探开发领域,针对中等埋深(2 500~3 500 m)砂岩储层预测的极限厚度一般可以达到5~10 m,而小于5 m的超薄储层准确预测仍为工业界难题。基于厄瓜多尔安第斯14和17区块不同时期采集和处理的多工区叠后地震数据,采用构造趋势面驱动叠后连片一致性处理,压制了多工区相位、能量、频率及闭合差等因素对薄层反射的干扰,降低了储层预测的多解性。基于时-频衰减高精度合成记录标定方法,消除由于地层吸收产生的时间累积误差,精确标定和解剖薄层反射特征,确定了超薄储层分辨的最低主频。基于无井驱动的“稳态变时频子波”叠后宽频有效信号高分辨率处理技术,有效恢复了薄层弱反射系数。基于宽频地震波形约束,优化了相控非线性反演的算法与工作流程。通过上述研究,形成了一套有效的超薄砂岩储层综合预测方法和技术体系,成功地实现了埋深3 000 m、厚度2~5 m潮汐水道砂体的精准预测,新钻滚动评价井和开发井验证其预测准确率达到90%以上。

关键词:宽频信号重建;相控波形反演;构造面;潮汐水道;超薄层;储层预测;厄瓜多尔

中图分类号:TE132.1

文献标识码:A

Predication methods of ultra-thin sandstone reservoirs and their application to blocks 14 and 17 in the Andes, Ecuador

WANG Guangfu¹, XU Hai¹, LI Fayou¹, SUN Jianfang¹, DUAN Wenlong²[1. *Petroleum Exploration and Development Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China*; 2. *Institute of Geophysics, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*]

Abstract: The minimum sand thickness for clastic reservoirs at medium burial depth between 2 500 and 3 500 meters to be predictable with current techniques is generally no more than 5 to 10 meters, while prediction of ultra-thin reservoirs with a thickness less than 5 meters remains a tough challenge. Based on the post-stack seismic data acquired and processed at different times from blocks 14 and 17 in the Andes of Ecuador, this study uses the post-stack consistent processing method driven by the structural trend surface to suppress and eliminate the interference of phase, energy, frequency and closure error on thin-bed reflection and reduce reservoir prediction uncertainty. The time-frequency attenuation, high-precision synthetic seismogram calibration method is employed to erase the accumulative time shift caused by formation absorption, accurately calibrate and analyse reflection characteristics of thin layers, and determine the minimum predominant frequency for resolving ultra-thin reservoirs. The weak reflection coefficient of thin layers is also effectively restored by using the high-resolution processing technology on post-stack broadband signals of “steady-state time-frequency-varying wavelet” without well data driving. The algorithm and workflow of facies-controlled waveform inversion are optimized based on broadband seismic waveform constraints. A series of technologies have then been developed and applied to the blocks, from which some tidal channel sand bodies of only 2 to 5 meters thick and 3 000 meters deep were successfully mapped. The drilling results of new appraisal wells and development wells verified that a prediction accuracy of at least 90 % with the methods has been reached.

Key words: broadband signal restoration, facies-controlled waveform inversion, structural surface, tidal channel, ultra-thin bed, reservoir prediction, Ecuador

收稿日期:2022-12-20;修订日期:2023-01-20。

第一作者简介:王光付(1965—),男,博士、教授级高级工程师,油气田开发。E-mail: wanggf.syky@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技部基金项目(P20072-2)。

引用格式:王光付,徐海,李发有,等.超薄砂岩储层预测方法研究与应用——以厄瓜多尔安第斯14和17区块为例[J].石油与天然气地质,2023,44(2):247-263. DOI:10.11743/ogg20230201.

WANG Guangfu, XU Hai, LI Fayou, et al. Predication methods of ultra-thin sandstone reservoirs and their application to blocks 14 and 17 in the Andes, Ecuador[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 247-263. DOI: 10. 11743/ogg20230201.

薄储层预测一直是油气勘探开发领域的热点和难点,其预测准确率不仅与储层厚度、岩性类型、围岩物理特性相关,还与地震资料类型和品质、地球物理预测方法密切相关。长期以来,业界普遍认为地震视分辨率极限厚度为 $\lambda/4$ (λ 为主频波长),小于极限分辨厚度的储层被称为超薄储层。随着勘探开发对象聚焦更深、更薄的地质目标,薄层或超薄储层识别和预测的要求越来越高,技术难度越来越大。近年来发展的一系列与薄层预测相关的高分辨率地震资料采集、处理和反演技术,有效推动了薄层油气勘探^[1-9],但基于常规叠后地震资料实现超薄储层精准预测,仍面临主频低、频带窄的挑战,分辨率制约着薄储层预测。为进一步提高常规地震数据分辨能力,不同学者在信号分析领域发展了一系列拓展地震频带宽度的处理方法,形成了反褶积、反Q补偿、谱反演等技术^[10-20],在薄层识别与预测中被广泛应用。Chakraborty^[21]等阐述了利用小波变换的方法对不同频率用不同尺度进行分析,它能给出比较好的时间精度,在低频区有很好的频率精度,而在高频区频率分辨能力较弱。Rodriguez等^[22]提出了一种基于对时频变换应用稀疏约束的噪声衰减技术,产生了更好的噪声衰减信号。崔少华等^[23]人研究了小波变换方法去噪,但该方法没有增加带宽,只是增加带宽内的局部频率能量。Stockwell^[24]对S变换进行了详细阐述,Pinnegar^[25]将该方法推广,并应用于地震信号时-频分析,它是短时傅立叶交换和小波变换的组合。高静怀等^[26]在S变换基础上,提出广义S变换,理论上可以确定厚度为 $\lambda/8$ 的薄互层。黄捍东等^[27]通过实验验证了广义S变换能够提高分辨率。近年来,不少学者利用地震分频技术来解释薄层,如PuryearCI^[28]采用离散傅里叶变换得到的频谱分解来求取薄层厚度。杜斌山等^[29]通过小波分频技术对井旁地震道和测井反射系数序列进行分频处理,提高了层位标定准确性,降低薄层预测多解性。Al-Dossary^[30]提出将马尔可夫链蒙特卡罗与Metropolis-Hastings结合,解决了反褶积盲解过程中小波时移和尺度模糊问题。迟唤昭等^[31]等通过提取时变子波提高谱反演反射系数的准确性,将其与宽频零相位子波进行褶积运算,改善了复合波叠置问题,保持了振幅与砂体对应关系。

储层反演是薄层定量识别和预测的主要手段,以地质统计学为代表的高分辨率反演、基于模型的高分辨率反演以及波形指示或相控反演等多种方法,逐渐获得了业界的重视和推广。贾承造等^[32]提出的重构地震储集层和精细划分层序地层单元的地震勘探核心技术,地震层序格架约束对薄储层预测具有十分重要的意义。高君等^[33-34]通过波形指示反演(SMI),利用地震波形相似性优选相关井样本开展储层反演,该方法适用于横向变化快的薄互层储层。杨文采^[35]经过研究证明非线性反演可以获得分辨率更高的波阻抗反演结果。黄捍东^[36]在非线性的基础上引入相控思想,赋予反演地质意义,结果更符合地质规律。

厄瓜多尔安第斯14和17区块M1砂岩为白垩系Napo组潮汐水道沉积,埋深3 000 m左右,单砂体厚度仅2~5 m,属于超薄储层。工区包含多块叠后地震资料,因一致性处理与地震分辨率等问题,传统的叠后处理、合成记录标定、地质统计学反演很难精确预测薄储层的空间分布,导致部分探井失利。通过开展构造趋势面驱动叠后一致性连片处理消除非一致性问题、建立时-频衰减曲线准确地标定测井岩性旋回与地震波组的对应关系、采用无井驱动的“稳态变时频”信号重构技术保真恢复高/低频信号、基于宽频地震波形约束优化相控反演工作流程,形成一套有效的超薄砂岩储层综合预测方法和技术体系,定量识别出2~5 m厚潮汐水道砂岩分布,并有效应用于该油田滚动评价和开发井位部署,预测准确率达90%以上。

1 油藏地质与地球物理概况

1.1 沉积地层特征

厄瓜多尔安第斯14和17区块位于南美安第斯造山带东侧奥连特盆地,面积约 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$,是厄瓜多尔最主要的含油气盆地。盆地主要含油层系为白垩系Hollin组和Napo组(图1),其中Napo组M1层为浅海陆棚背景下海陆过渡相河口湾和潮控三角洲沉积,盆地东部发育厚层块状砂岩,西部发育薄层砂岩。

工区M1砂岩为潮汐水道沉积,厚度超薄,仅2~5 m,上、下围岩接触关系复杂,岩性以石英砂岩为主,

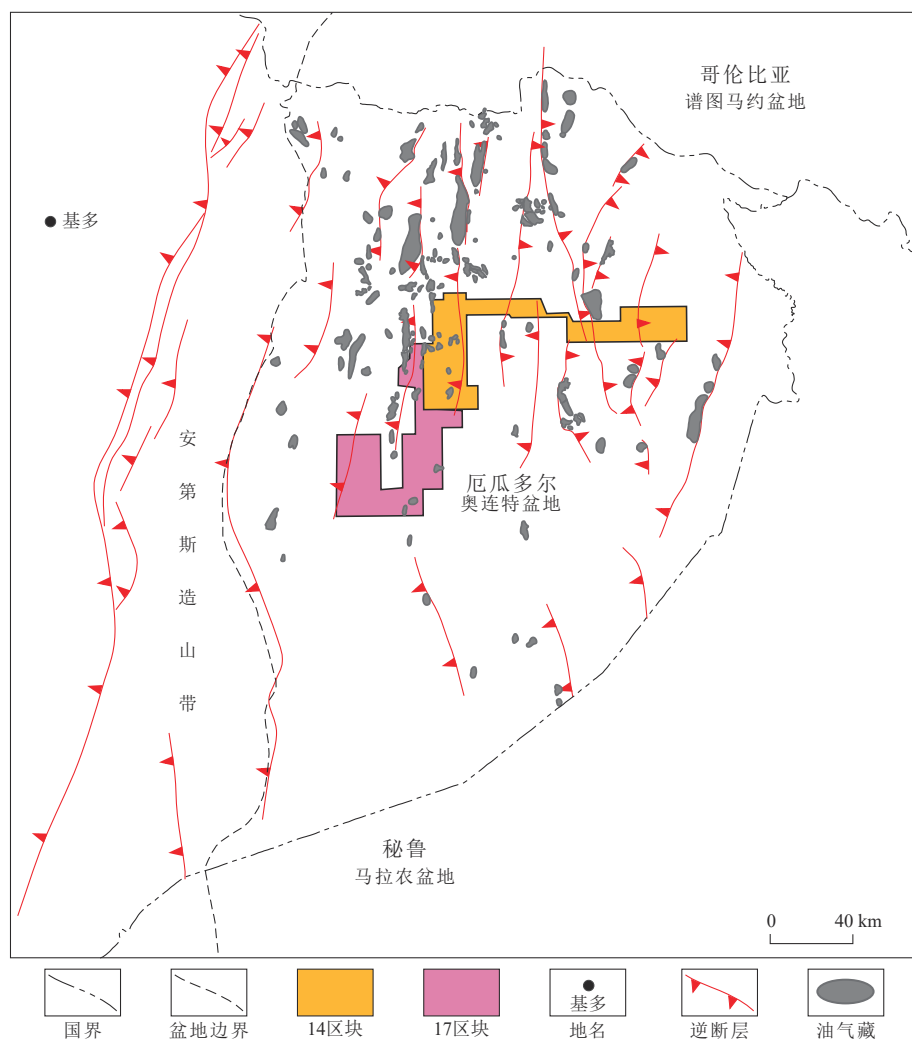


图1 厄瓜多尔安第斯14和17区块位置(据参考文献[37]修改)

Fig. 1 Location map of blocks 14 and 17 in the Andes, Ecuador (Modified according to reference [37])

颗粒主要为粗-中粒岩屑砂岩、中-细砂岩和极细砂岩;磨圆度为次棱角-次圆状,分选中等;以泥质胶结为主,偶见钙质胶结;砂岩成分成熟度较高,属于中孔-特高渗砂岩储层。M1砂岩具有较好的岩-电响应特征,储层岩性和物性越好,其自然电位值负异常幅度越大,自然伽马值越小、密度越小、中子孔隙度越大、声波时差越大。

1.2 岩石物理响应特征

M1砂体自然伽马与波阻抗交会图显示(图2a),波阻抗特征不能有效区分砂岩和泥岩。泥质含量与波阻抗关系表明(图2b),随泥质含量的增加,波阻抗也逐渐增加,表现为砂岩低阻抗、泥岩高阻抗。砂岩孔隙度与波阻抗呈负相关,随着孔隙度增加,波阻抗逐渐降低(图2c)。

1.3 超薄储层预测的挑战

工区包含多块不同时期采集处理的叠后地震数据,由于热带雨林复杂地表造成统一基准面差异较大,时间切片显示存在明显的能量、频率等差异,地震解释闭合差绝对值高达50 ms(图3)。采用常规叠后拼接处理方法,存在低幅构造形态保持程度低、频率能量一致性差等问题,无法保证薄层反射层位精细解释追踪和储层预测精度。

此外,工区叠后地震数据主频约42 Hz(图4), $\lambda/4$ 分辨能力约26 m。已钻井显示M1砂岩厚度2~5 m,远小于 $\lambda/4$ 的调谐分辨能力,传统波阻抗反演方法不能有效识别M1砂岩;由于油田采用平台式钻井,入靶点分布不均,不能满足地质统计学反演条件。因此,需要探索超薄层预测的地球物理技术路径及其新方法。

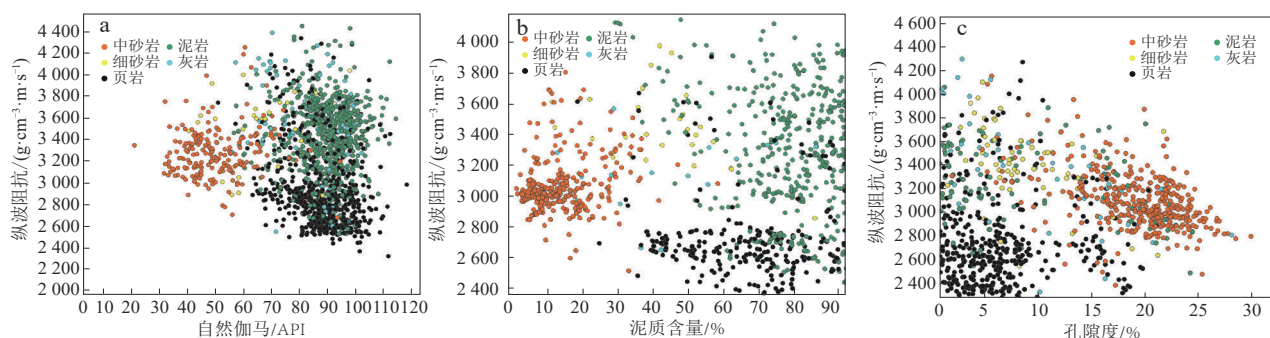


图2 安第斯14区块南部M1层砂、泥岩岩石物理响应特征交会图

Fig. 2 Crossplots of petrophysical characteristics of sandstone and mudstone in Layer M1, southern block 14 of the Andes

a. 自然伽马与纵波阻抗; b. 泥质含量与纵波阻抗; c. 岩石孔隙度与纵波阻抗

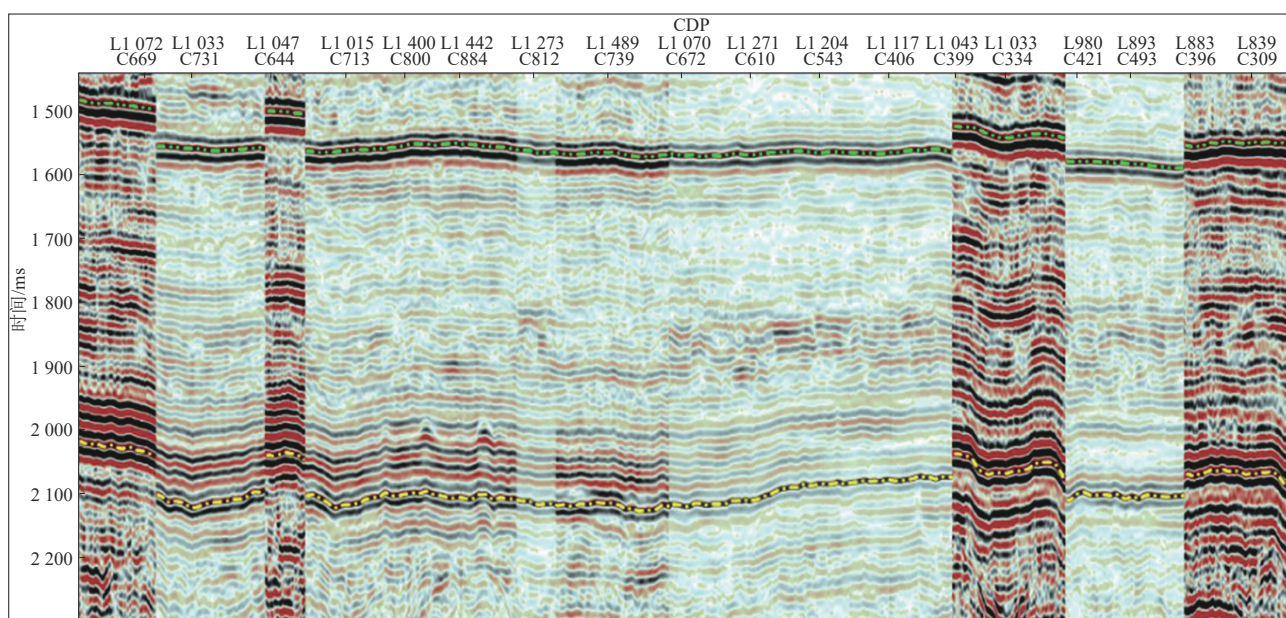


图3 安第斯14和17区块叠后地震剖面闭合差异显示

Fig. 3 Mistie error on post-stack seismic profiles in blocks 14 and 17 of the Andes

2 超薄层预测地球物理技术路径及方法

2.1 基于构造趋势面驱动的叠后连片处理技术

因采集、处理等参数差异,不同时期的地震数据之间会存在不一致性问题^[38-39]。相比于叠前地震处理,叠后地震校正方法很少考虑基准面充填速度或基准面不同平滑参数引起的长、短波长空间变化,在“非重叠区”通常仅考虑常量时移校正或局部时差校正,在“重叠区”常采用多道加权平均消除残差^[40-42]。因此,目前通用的叠后闭合差校正方法,很难有效保持“非重叠区”的构造相对形态,容易导致“非重叠区”信号产生畸变。

为提高数据闭合精度、保持构造形态可靠性,针对当前常用的闭合差校正方法及算法中存在的不足,提出了“基于构造趋势面约束的闭合差求取方法”,弥补了“叠后连片处理”中“硬闭合校正”的缺陷,可有效保持“不同地震数据”相对微幅构造、能量、频率及波形特征。

2.1.1 构造驱动一致性处理思路

为消除不同处理参数与基准面的影响,以主体地震数据为基准数据,对各叠后地震数据处理参数进行匹配及常量时移校正。为消除基准面充填速度或基准面不同平滑参数引起的长、短波长空间变化,校正过程中选择能够反映同一地质年代、具有高信噪比的反射界面作为构造趋势面软约束,利用交汇区闭合差作为

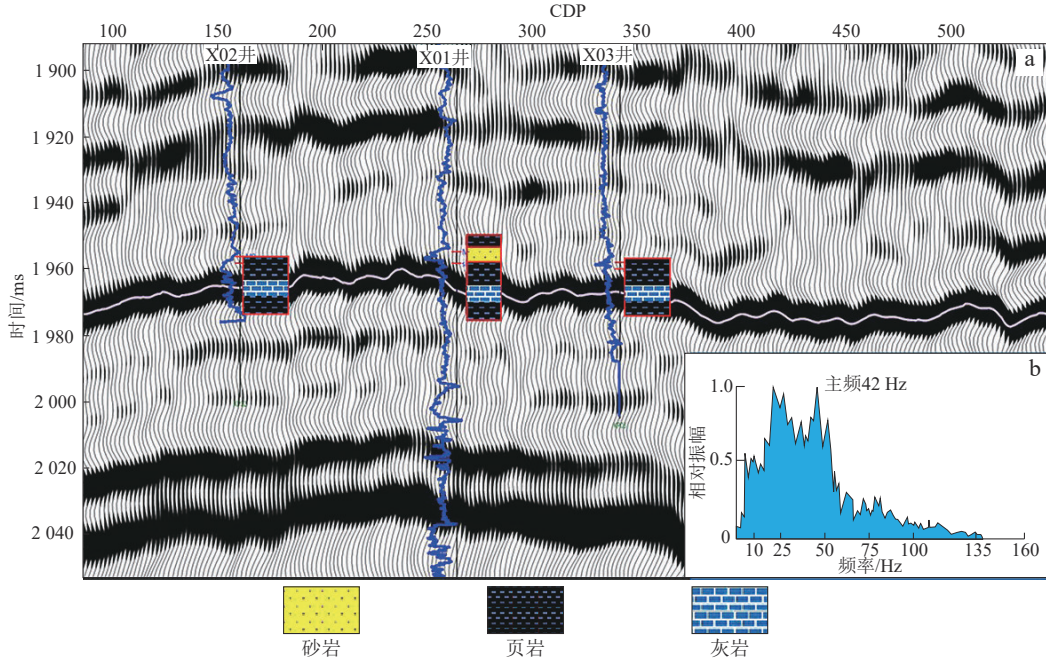


图4 安第斯14和17区块M1砂岩地震反射剖面(a)与频谱特征(b)

Fig. 4 Reflection profile and spectral characteristics of M1 sandstone in blocks 14 and 17 of the Andes

种子数据,分别计算高、低频校正分量,并应用至各工区地震数据,完成叠后连片一致性处理。

2.1.2 构造驱动闭合差求取方法

“趋势面”是指不受局部因素影响,经过抽象并过滤掉局部随机因素、受整体规律所支配的数学曲面。“趋势面分析”把空间曲面分解成整体与局部两部分:变化慢且影响全局的称为整体趋势,可以用确定性函数表示;变化比较快且影响局部的称为局部趋势,可用随机函数或确定性函数表示。趋势面分析方法通常应用于地质及地球物理分析中,主要目的是“保凸”,即在复杂区域实现对局部或微小异常的有效识别,对微幅构造识别与刻画具有重要的应用价值^[43-44]。

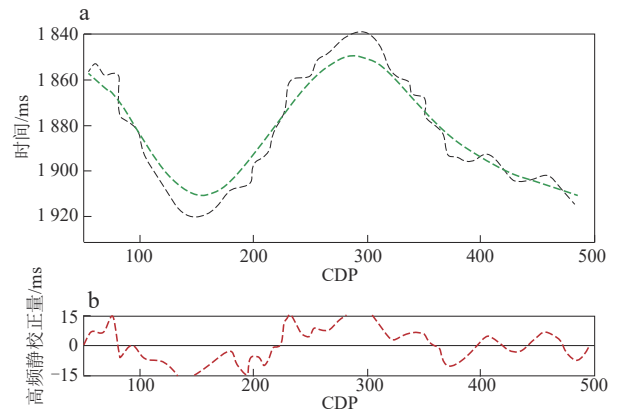
根据趋势面数学分析中整体与局部变化快、慢的特点,可将标准地震反射层位(黑虚线)分解成高频分量(红色虚线)、低频分量(绿色虚线)两部分作为趋势约束数据,分别求取重叠区外的空间闭合差(图5)。

2.1.3 低频趋势面闭合差求取

设地震数据重叠区同一地震反射层位闭合差为 $z_i(x_i, y_i)$,低频趋势拟合值为 $\bar{z}_i(x_{Li}, y_{Li})$,则有:

$$z_i(x_i, y_i) = \bar{z}_i(x_{Li}, y_{Li}) + \varepsilon_{Li} \quad (1)$$

$$\text{Min}Q = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{Li}^2 = \sum_{i=1}^n [z_i(x_i, y_i) - \bar{z}_i(x_{Li}, y_{Li})]^2 \quad (2)$$

图5 安第斯14和17区块解释层位 T_0 线(a)与高频趋势线(b)对比Fig. 5 Comparison between T_0 line (a) and high frequency trend line (b) of the interpreted horizon in blocks 14 and 17 of the Andes (黑色虚线为层位构造切面,绿色虚线为低频趋势切面,红色虚线为高频趋势切面。)

式中: $i = 1, 2, 3, \dots, n$; $Li = 1, 2, 3, \dots, n$; z_i 代表实际时间,ms; x_i 代表横坐标; y_i 代表纵坐标; $\bar{z}_i$ 代表拟合时间,ms; ε_{Li} 代表低频趋势残差,ms。当最小二乘法平方根残差最小时,可求得 $\bar{z}_i(x_{Li}, y_{Li})$ 与构造整体趋势高度相关的低频静校正量。

假设观测值为 $z_i(x_i, y_i)$,确定 x_{Li}, y_{Li} 多项式系数 $a_0, a_1, \dots, a_k$,使残差平方和最小。

令 $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = x^2, x_4 = xy, x_5 = y^2, \dots$,则有:

$$\bar{z} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \cdots + a_k x_k \quad (3)$$

使最小二乘法确保均方根残差最小,则有:

$$\begin{aligned} \text{Min}Q &= \sum_i^n [z_i - \bar{z}_i]^2 = \\ &= \sum_i^n [z_i - (a_0 + a_1 x_{1i} + a_2 x_{2i} + \cdots + a_k x_{ki})] \end{aligned} \quad (4)$$

对 $\text{Min}Q$ 求偏导,即令其等于 0,得到含有 $a_0, a_1, \cdots, a_k$ 的 $k+1$ 个未知量方程组,并对系数进行求解。

利用“重叠区”的低频趋势初始种子点(图 6a),对非重叠区开展构造趋势约束(图 6b),计算闭合差静校正量(图 6c)。

与传统“保凸随机函数”算法相比,利用高、低频趋势构建的确定性函数,求取的结果具有更高的稳定性与可靠性。

2.1.4 叠后一致性处理效果分析

将高、低频闭合差通过静校正量的形式加载至地震数据道头,并重复采用一致性处理方法最大程度消除数据间的能量、频率与相位等差异,对比数据处理前后剖面、切片能量发现,处理后目标层位反射连续性好,基本消除了闭合差与能量等非一致性的影响(图 7)。

应用构造趋势面约束的闭合差校正方法,考虑了基准面、浮动基准面以及充填速度的影响,弥补了叠后多数据“硬闭合校正”的缺陷,一定程度上消除多工区地震数据处理中的时间、振幅、能量及频率等参数差异,相比传统方法,可有效保持微幅构造相对形态,提高复杂构造或低幅度构造多目的层连片地震解释成图精度和储层预测效率。

2.2 基于时频衰减的高精度标定技术

超薄地质目标体的准确识别,对合成地震记录标定提出了更高的要求^[45-46]。目前常用的层位标定包括 VSP、相对标定和井-震平均速度等^[47-52]方法,“拉伸与压缩”相对标定方法主要利用强波组反射边界来保证储层组的标定精度,会改变反射系数的大小与能量;“多时窗变子波的时差均匀补偿”方法,考虑子波变化与“时差累积效应”,局部累积误差采用均匀分配方式,也会改变反射系数大小。

考虑采用一种非强硬拉伸或压缩、时差非均匀补偿进行合成地震记录标定,求取非均匀时差补偿衰减系数,消除由于地层吸收效应而产生的累积时差,获取准确的时-深关系,确保超薄层反射系数和波组关系稳定,提高波组内超薄层反射标定与反演精度。

2.2.1 超薄层高精度标定技术思路

为提高超薄层的标定精度,明确其内部反射与波组特征,通过对测井资料进行环境校正,消除不同测量年代、仪器以及人为因素引入的正负基线误差,确保声波曲线能够反映真实地层速度。提取目的层段子波主频,利用互相关方法求取衰减系数,完成基于时-频衰减的高精度合成记录标定。

2.2.2 井-震时间匹配衰减系数求取

通过建立地震记录波形与合成记录波形两个信号的互相关函数,计算最大相关值对应的时延就是合成记录漂移时间,然后利用漂移时间与地震记录时间计算衰减系数 Q_f 。

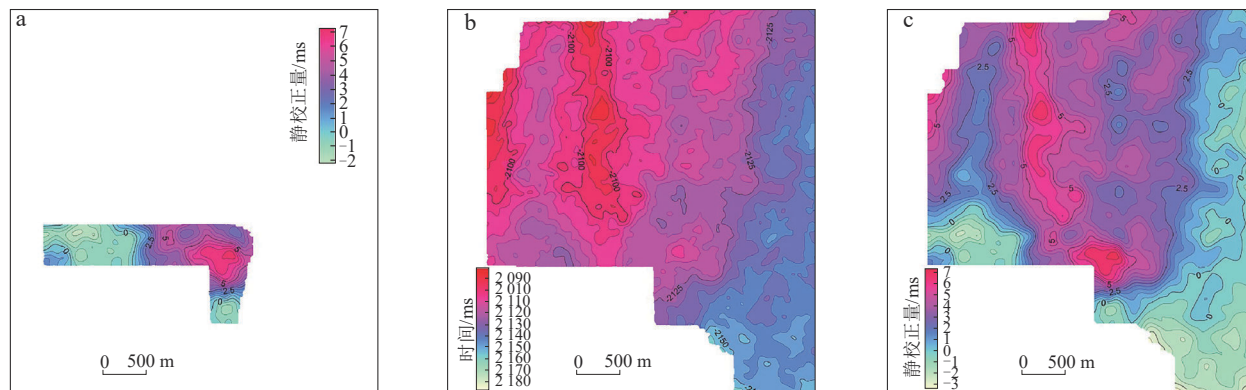


图6 安第斯14和17区块低频趋势面闭合差求取

Fig. 6 Closure error determination for the low-frequency trend surface in blocks 14 and 17 of the Andes

a. 重合区低频种子数据; b. 重合区外低频趋势约束数据; c. 重合区外低频闭合差

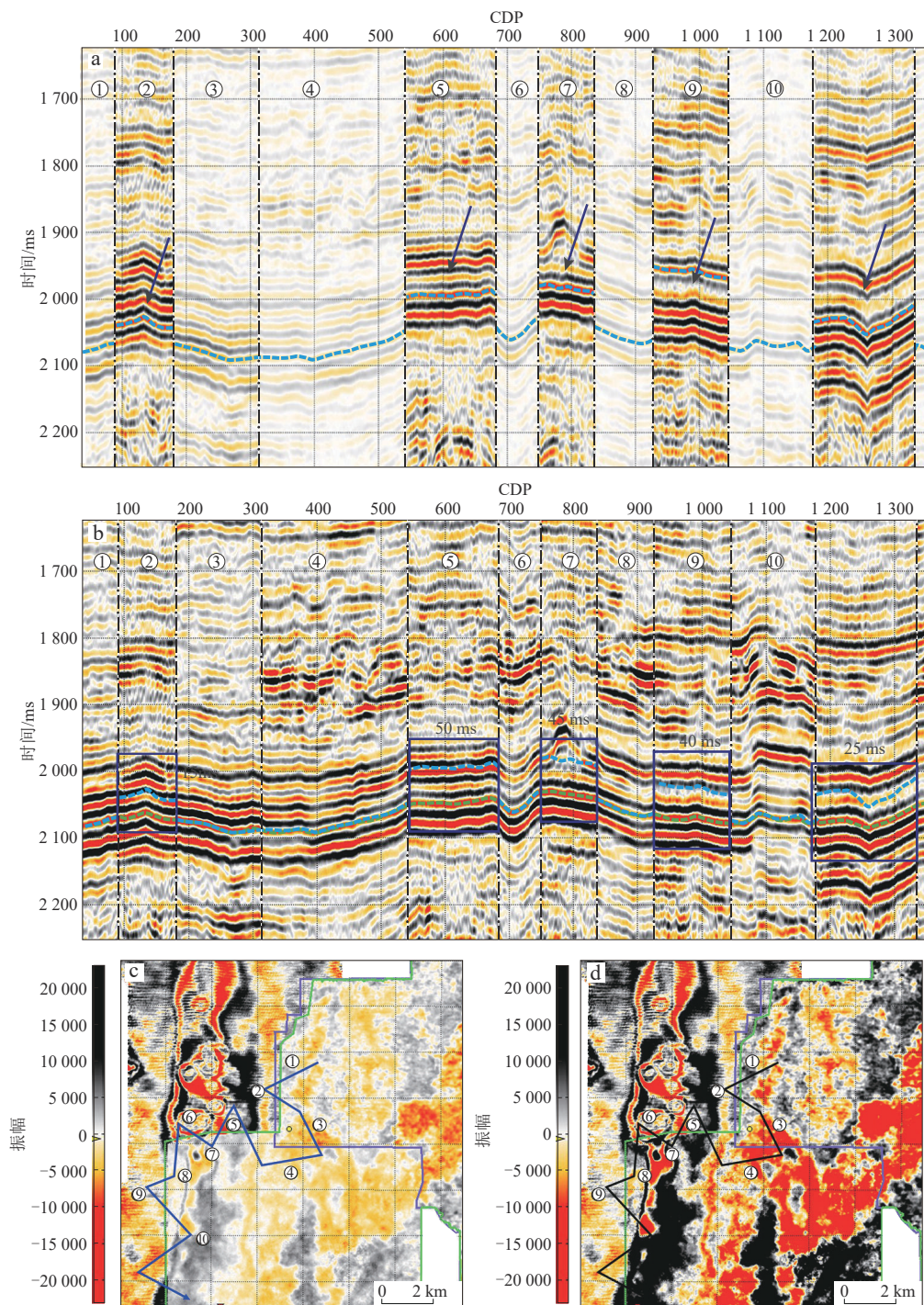


图7 安第斯14和17区块处理前、后平面与剖面闭合与能量对比

Fig. 7 Comparison of closure error and energy on seismic profiles and time slices of blocks 14 and 17 in the Andes before and after processing

a. 多工区处理前地震剖面; b. 多工区处理后地震剖面; c. 多工区处理前时间切片与剖面位置; d. 多工区处理后时间切片与剖面位置
(1、2、3、4...代表不同位置折线段。)

设地震信号序列是 T_{seismic} (共 R 个采样点), 合成记录信号序列是 T_{sonic} (共 S 个采样点), 且两个信号采样率皆为 f_s 。对 T_{sonic} 前、后对称取值, 以中心点 $S/2$ 为中心得到预参考序列 T_{sonic}^K (K 个采样点), 利用相关公

式得:

$$\tau_k(n) = \sum_{i=0}^K T_{\text{sonic}}^K(i) T_{\text{seismic}}(i + nT_s) \quad (5)$$

式中: τ_k 是预参考序列互相关值; n 是接收信号中参与

运算的起始采样点序号; T_s 是地震信号采样点时间间隔。

当 n 取值遍历所有前 $(S - K)$ 个接收点, 计算得到最大相关值 $\tau_{K \max}$ 和相关点序号 $n_{K \max}$, 从而得到合成记录漂移的渡越时间 $n_{K \max} T_s$ 。所求取的 Q_f 及测井与地震的速度关系为:

$$Q_f = \frac{T_{\text{seismic}}}{T_{\text{sonic}}} = \frac{T_{\text{seismic}}}{T_{\text{seismic}} + n_{K \max} T_s} \quad (6)$$

$$V_i^{\text{Seismic}} = V_i^{\text{Sonic}} Q_f \quad (7)$$

式中: V_i^{Seismic} 为地震层速度, m/s; V_i^{Sonic} 为声波测井层速度, m/s; i 为自然数 $(1, 2, 3, \dots, n)$ 。

设声波测井地层厚度平均反射系数的表达式为:

$$r_i = \frac{\rho_{i+1} Q_f V_{i+1}^{\text{Sonic}} - \rho_{i+1} Q_f V_{i+1}^{\text{Sonic}}}{\rho_{i+1} Q_f V_{i+1}^{\text{Sonic}} + \rho_{i+1} Q_f V_{i+1}^{\text{Sonic}}} = \frac{\rho_{i+1} V_{i+1}^{\text{Seismic}} - \rho_{i+1} V_{i+1}^{\text{Seismic}}}{\rho_{i+1} V_{i+1}^{\text{Seismic}} + \rho_{i+1} V_{i+1}^{\text{Seismic}}} \quad (8)$$

式中: ρ_i 为层密度, g/cm^3 ; V_i 为层速度, m/s; i 为自然数 $(1, 2, 3, \dots, n)$ 。

由公式(8)可知, 利用速度衰减系数标定地震合成记录, 不会改变计算的高频声波反射系数, 并可确保反射系数及波组关系稳定。

2.2.3 超薄层合成记录标定分析

分析 M1 超薄砂岩 (厚度 2 ~ 5 m) 在 $\lambda/4$ 波长之内的反射位置与地震响应特征, 基于同一时-深关系, 分别采用 42, 60 和 85 Hz 主频子波对原始地震数据进行标定 (图 8), 其中 42 Hz 和 60 Hz 合成记录波组皆为波谷, 砂体无响应, 而 85 Hz 正演合成记录可识别 M1 单砂体反射界面 (图 8, 85 Hz 薄层波谷响应), 从而确定 M1 砂岩理论上可分辨的子波主频最小值为 85 Hz。

2.3 基于谱反演与稳态子波的宽频重构技术

常规地震资料提高分辨率方法, 包括反褶积、时变谱白化、反 Q 滤波和谐反演处理等^[52-60]。Castagna 等探讨了一种叠后谱反演方法, 利用局部频谱信息反演反射系数序列, 采用确定性子波或统计子波, 不能满足子波时变特性的要求; 离散子波忽略了噪声对求取微小反射系数的影响, 降低了地震信号重构和薄层识别精度。

2.3.1 基于“稳态变时频子波”的宽频信号重构思路

利用去噪技术减弱或压制噪声、提高信噪比后^[61-64], 基于广义 S 变换求取非稳态离散子波库, 建立“稳态变时频”的连续子波函数, 消除离散子波基对反射系数求解的影响, 利用该函数与 L1 范数求解反射系数, 对宽频有效信号进行重构得到高分辨率地震数据体。

2.3.2 时变子波库与稳态子波函数求取

引用陈学华、高经怀等人建立的广义 S 变换^[26-27], 其数学表达式为:

$$GST[x(\tau, f)] =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{|f|^{\text{rgs}}}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\tau - t)^2 f^{\text{rgs}}}{2\rho^2}\right] \exp(-i2\pi ft) dt \quad (9)$$

式中: τ 表示时间, ms; f 表示频率, Hz; rgs 与 ρ 为频率与高斯窗函数大小调节参数; $GST[x(\tau, f)]$ 表示 $x(t)$ 的广义 S 变换。

通过该变换, 提取不同位置与时间的子波, 并利用子波库记录不同位置与时间的子波 (图 9)。

根据得到的时间与频率、能量变化关系 (图 10),

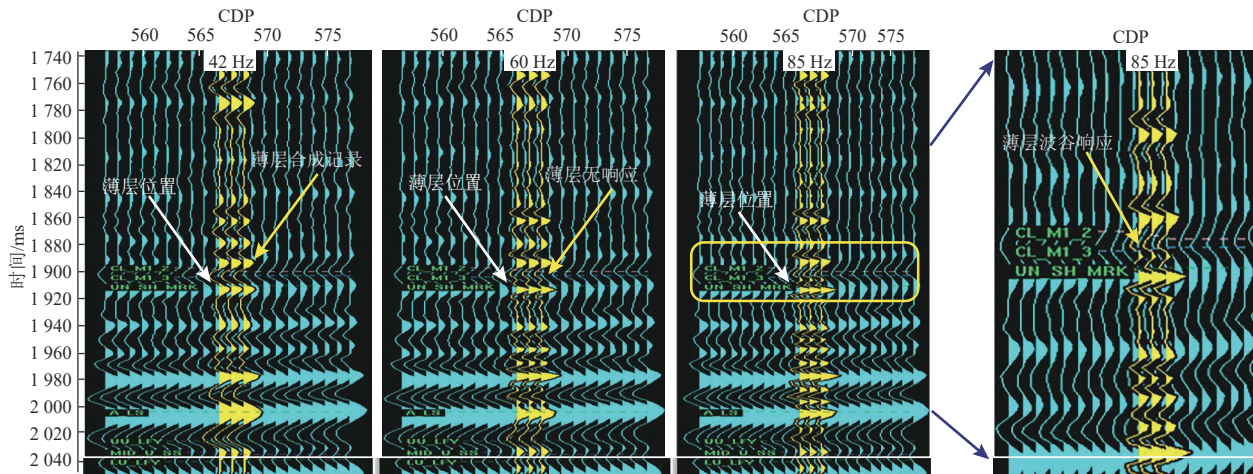


图8 安第斯14和17区块不同主频子波标定与薄层分辨率对比

Fig. 8 Wavelet calibration and thin layer resolution comparison for different main frequencies in blocks 14 and 17 of the Andes

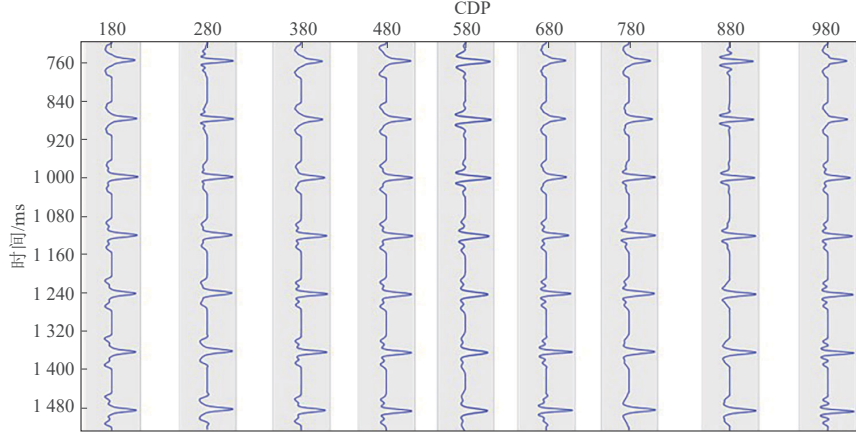


图9 安第斯14和17区块不同时空位置子波

Fig. 9 Wavelets at different spatial-temporal locations in blocks 14 and 17 in the Andes

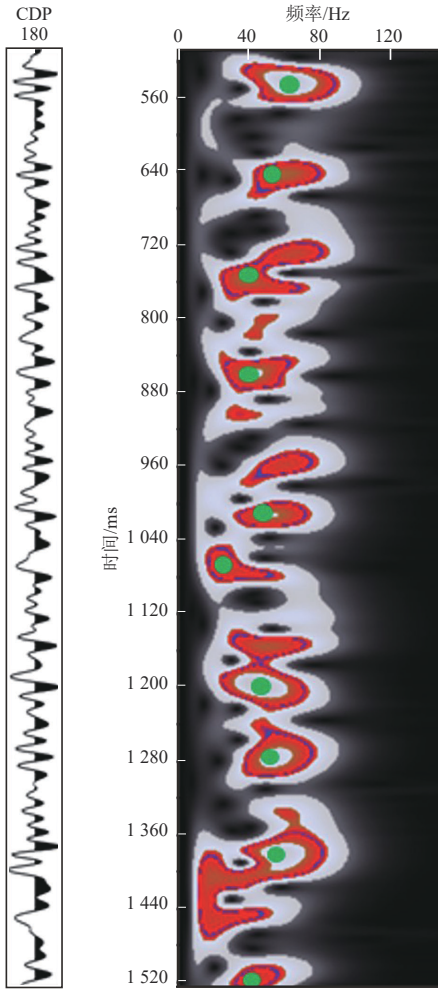


图10 安第斯14和17区块 CDP180测线频率和能量随时间变化
Fig. 10 CDP 180 frequency and energy curves over time of blocks 14 and 17 in the Andes

建立子波主频/频率随时间变化的衰减函数,指数衰减拟合后的“稳态变时频”子波拟合公式为:

$$f_0 = f_s - k \ln t \quad (10)$$

式中: f_0 代表随时间变化的子波主频,Hz; f_s 代表子波初始最高主频,Hz; k 代表拟合系数,无量纲; t 代表时间,s; $\ln t$ 代表时间的对数衰减。

雷克子波公式为:

$$r(t) = [1 - 2(\pi f_0 t)^2] \exp[-(\pi f_0 t)^2] \quad (11)$$

式中: $r(t)$ 代表雷克子波函数。

将公式(10)代入公式(11)得到“稳态变时频”子波函数:

$$W(t) = [1 - 2(\pi_0 t(f_s - k \ln t))^2] \cdot \exp[-(\pi_0 t(f_s - k \ln t))^2] \quad (12)$$

式中: $W(t)$ 代表随时间变化的稳态变时频子波。

根据地震信号处理原理,频率域地震信号可以表示为:

$$S(f) = W(f)R(f) + N(f) \quad (13)$$

式中: $S(f)$ 为地震记录; $W(f)$ 为“稳态变时频”地震子波; $R(f)$ 为反射系数; $N(f)$ 为噪声; f 为频率,Hz。

则地震记录求取公式为:

$$S(f) = W(f)[\alpha_i e^{(-i2\pi t_i f)} + \beta_i e^{(-i2\pi t_i f)}] + N(f) \quad (14)$$

式中: α_i 与 β_i 分别为奇、偶反射系数,无量纲; t_i 为反射系数所对应的时间,ms。

最后,利用奇、偶反射系数开展连续小波逆变换^[65-66],获得“稳态变时频子波”的宽频信号重构数据体。

2.3.3 叠后信号重构有效性及效果分析

为验证宽频信号保真重建的可信度,采用浅层标志层的RMS(均方根振幅)属性开展分析对比,原始地震数据的RMS显示水道相互叠置、边界模糊(图11a),宽频重构地震数据的RMS显示单一水道边界清晰(图11b)。

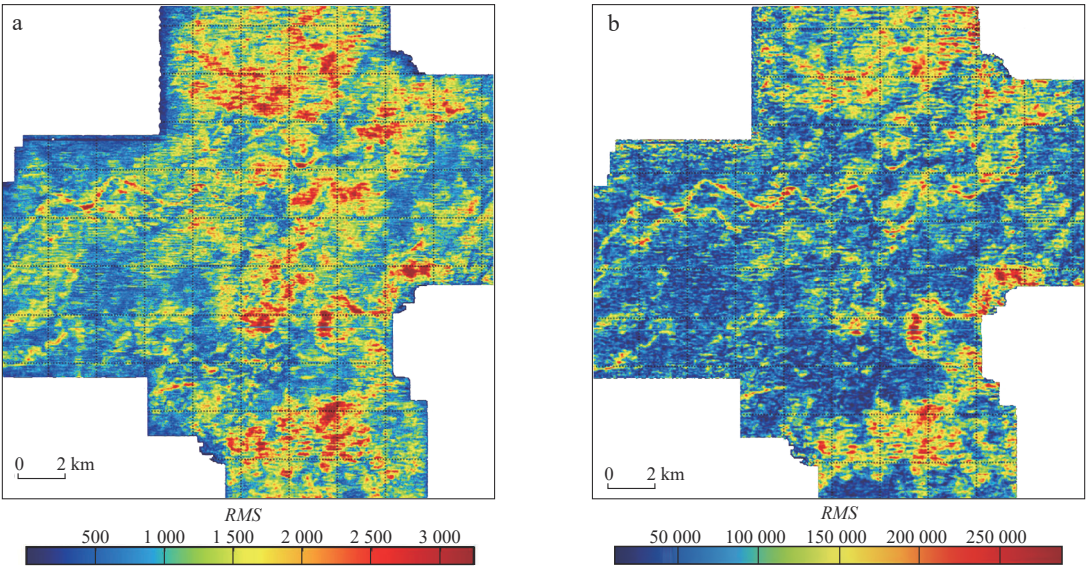


图 11 安第斯 14 区块原始地震数据(a)与宽频地震数据(b)标志层 RMS 属性评价对比

Fig. 11 Comparison and evaluation of seismic RMS attribute of marker layer between the original and the broadband seismic data of block 14 in the Andes

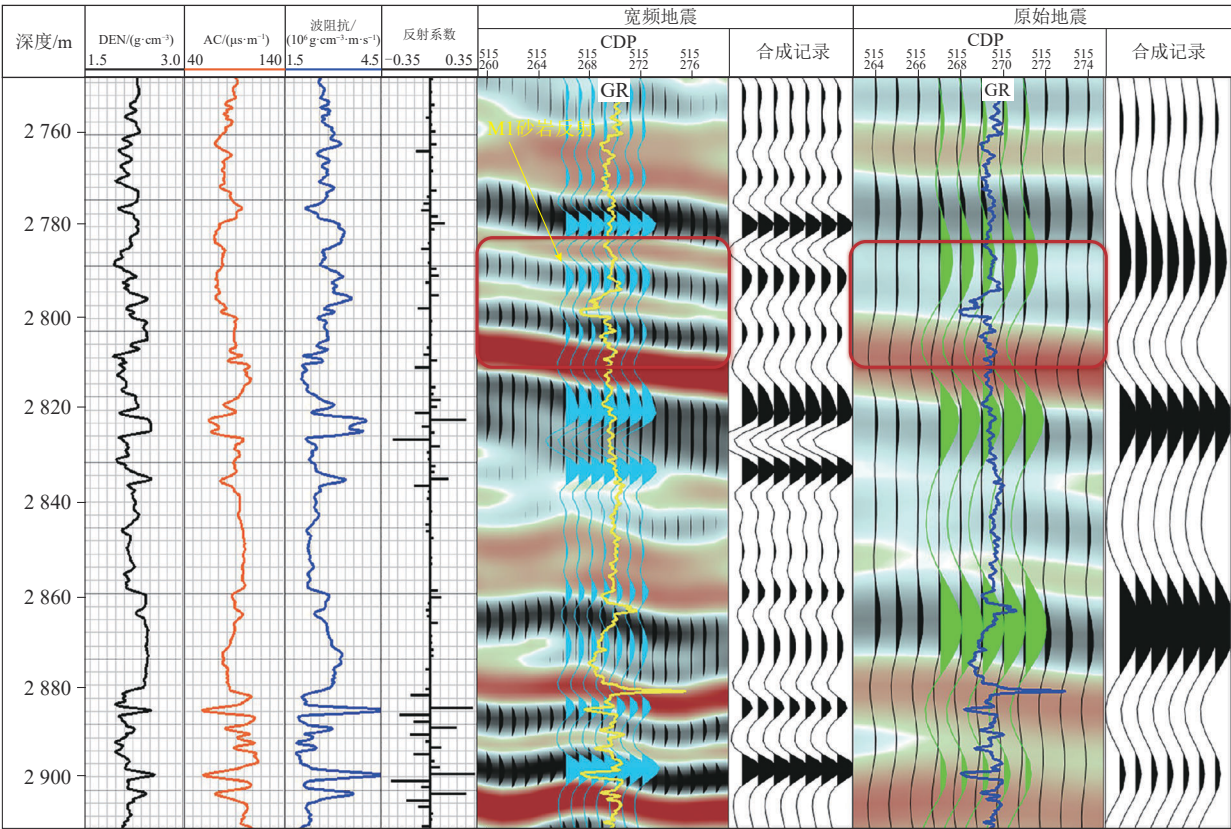


图 12 安第斯 14 区块 X01 井宽频地震数据与原始地震数据目标层合成记录标定对比

Fig. 12 Comparison of synthetic seimograms of the target horizon in well X01 between the broadband and the original seismic data in block 14 of the Andes

同一时-深关系下,对比 X01 井不同子波标定的合成记录(图 12),宽频地震数据 85 Hz 子波标定的 M1 超薄砂岩为弱波谷反射,3.6 m 厚砂岩地震响应清晰(图 12);而原始地震数据 45 Hz 子波标定的 M1 砂岩反

射位于零交叉点附近,砂岩难以识别(图12)。

对比原始与宽频地震数据的目标层连井地震剖面(图13),原始地震剖面显示储层与非储层的反射皆位于零交叉点附近,无法有效识别M1薄砂岩地震反射(图13a)。重构宽频信号地震剖面显示X01井中M1有效砂体反射位于弱波谷位置(图13b),薄砂岩显示清晰,有一定的连续性,而在X02井与X03井附近,M1砂体尖灭,不能形成反射界面,表现为波峰反射。

2.4 基于宽频重构地震数据的相控波形反演

目前的储层预测主要采用基于模型的反演方法,如地质统计学反演、稀疏脉冲反演等,主要技术思路是利用测井低频、地震中频和低频随机模拟相加合成,但超薄层高频模拟的合理性严重依赖井的均匀分布程度,约束井的不均匀分布使得随机性增强,从而不能精细表征超薄层的空间变化。基于波形特征的非线性反演方法,如相控非线性随机反演,对约束井井点分布不均情况的薄储层预测,往往可以取得较好的效果^[67-70]。针对工区储层超薄、横向分布零散、反演约束井分布不均等特点,开展基于宽频重构地震高分辨率相控反演预测。

2.4.1 宽频重构地震相控波形反演

宽频重构地震相控波形反演主要流程包括:利用时频衰减技术进行井震精细标定,建立低频层序框架模型;通过分频测井曲线,建立其与原始地震数据、宽频地震数据的对应关系,以相控层序约束对原始地震数据、宽频地震数据进行确定性反演,高频部分以波形为约束对其进行统计学模拟,实现超薄砂岩定量预测(图14)。

2.4.2 宽频地震反演结果分析

X01井在M1层钻遇3.6 m厚的砂岩,GR值约20 API。距离该井约1.7 km的X02井与X03井未钻遇砂岩,M1层GR值约90 API,解释为泥岩。对比3口已钻井地震反演结果(图15),宽频重构地震反演后的M1超薄砂岩地震响应特征清晰,砂体横向变化特征与宽频地震反射信息高度吻合。

基于宽频地震数据的相控波形反演方法,汲取了传统相控格架约束的优点,充分利用了薄层宽频地震信号的可识别性,利用可识别的波形与测井高频信息进行双向约束定量求解薄层信息,该技术可有效解决该区2~5 m厚超薄储层定量预测问题。

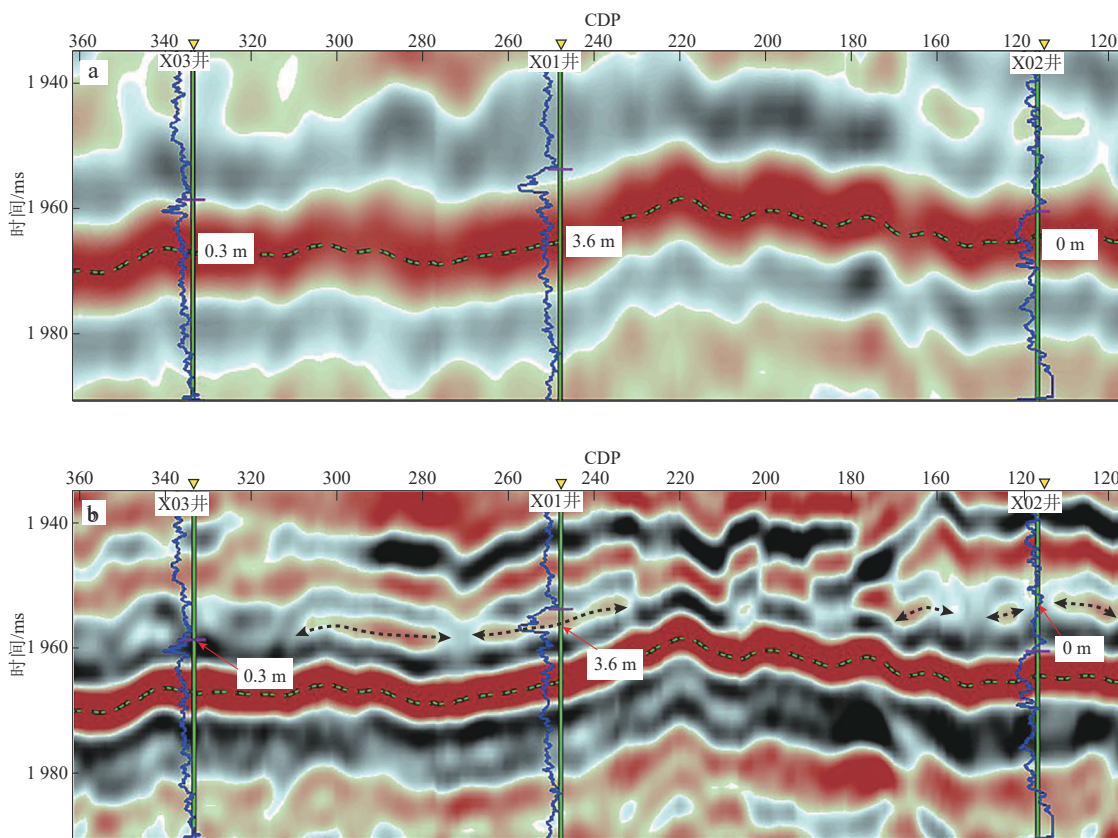


图13 安第斯14区块原始地震数据(a)与宽频地震数据(b)目标层连井标定对比

Fig. 13 Comparison of the target calibration between the original (a) and the broadband (b) seismic data in block 14 of the Andes

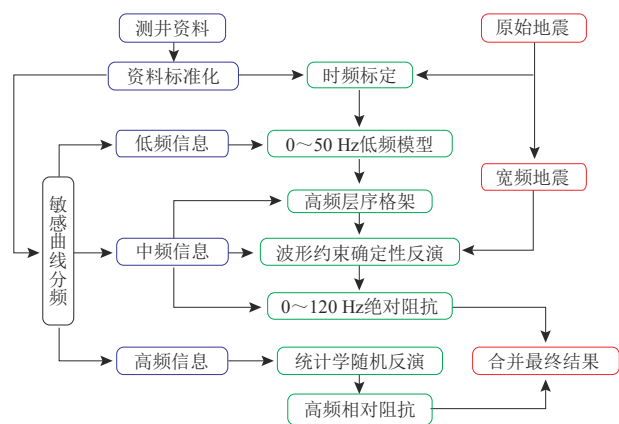


图14 安第斯14区块宽频地震相控反演技术流程

Fig. 14 Workflow of facies-controlled reversion of broadband seismic data of block 14 in the Andes

3 应用效果

3.1 K油田M1超薄砂岩油藏滚动开发效果

K油田位于安第斯14区块,1994年发现井X01并在M1层钻遇砂岩厚度3.6 m,净油层厚2.7 m,自投产以来已累产油 65×10^4 t。1995年部署的两口评价井均未钻遇有效储层,钻探失利。2011年,为继续评价该油田潜力,在K和W油田间部署了风险探井A01井,主探M1失利,勘探工作再次停滞不前。2018年,在阶段研究认识基础上,在油田外围区部署探井2口,其中X04井成功、X05井失利。结合两口井钻后分析,认为M1砂岩厚度超薄,现有地球物理储层预测方法具有较大不确定性。因此,开展超薄砂岩储层预测攻关,形成了宽频重构地震相控波形反演技

术方法,应用于该油田井位论证,14区块钻井预测精度达90%以上,X平台部署新井完钻6口(X04,X08,X11,X12,X15,X16Re井)(图16),均获成功,砂体钻遇率100%,预测厚度误差小于1 m,其中2口井高产,日产油均大于150 t。

3.2 N油田东南部M1超薄砂岩油藏滚动外扩开发效果

N油田为已开发超过20年的老油田,面临着产量快速递减和含水快速上升的挑战,在油田东南构造下倾方向,发育低幅度构造。2020年,结合M1油藏为低幅度构造岩性油藏的研究认识,采用新技术开展超薄砂岩储层精细预测,滚动部署评价井3口(图17),在M1层钻遇砂岩厚3~4 m,其中净油层厚2~3 m,砂岩厚度预测误差小于1.5 m,单井初期日产油120 t,发现了N油田东南部M1超薄层砂岩油藏。

4 问题与思考

薄层预测技术历经几十年的发展与不断完善,已经取得丰硕成果,但超薄层的定量预测仍是一个世界性难题。长期以来,公认的地震波“垂向可视分辨能力”的极限为 $\lambda/4$,薄层预测精度一直受限于地震资料视主频的大小与频带宽度。随着采集与处理技术的进步,“两宽一高”的采集与处理技术一定程度提高了薄层的定性识别能力;然而,采用传统的地震数据开展薄层预测还存在很多问题需要解决,薄互层地震反射信号始终受单层厚度、组内层数、物性差异及流体等因素影响,其定性识别能力一直与反射波频率和能量衰减的恢复技术密切相关。所以,在拓展有效带宽、克服振

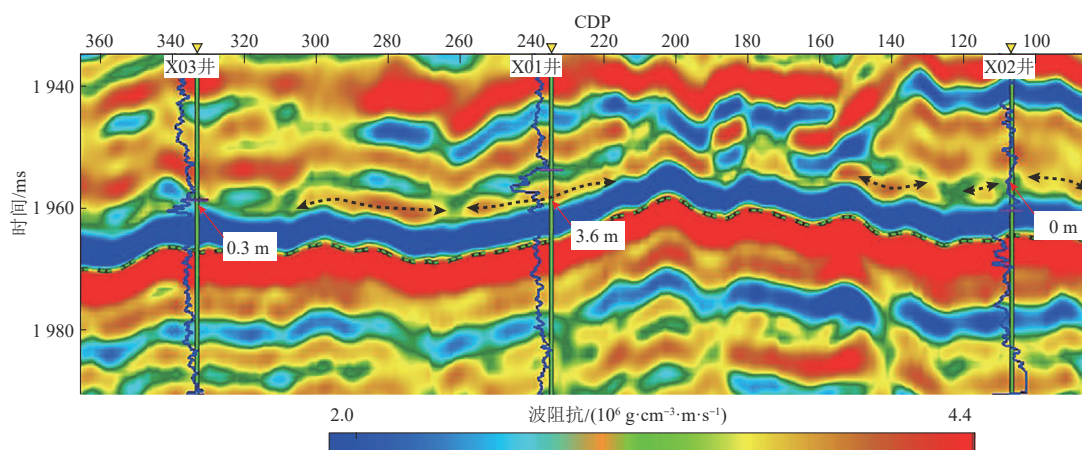


图15 安第斯14区块K油田M1砂岩宽频重构地震相控波形反演剖面

Fig. 15 Facies-controlled inversion profile of M1 sandstone in the K Oilfield of block 14 in the Andes based on broadband seismic data

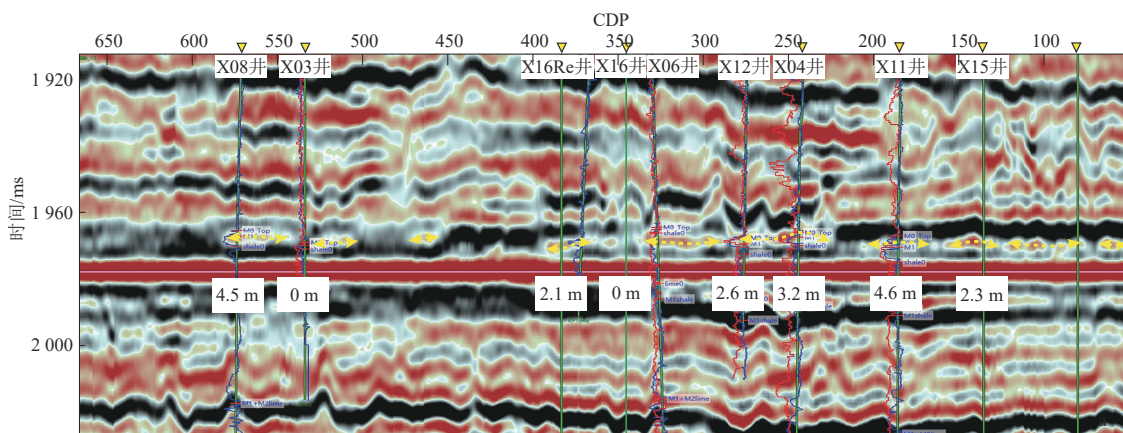


图16 安第斯14区块K油田新井实钻砂体厚度剖面

Fig. 16 Thickness profile of recently drilled sand bodies in K Oilfield of block 14 in the Andes

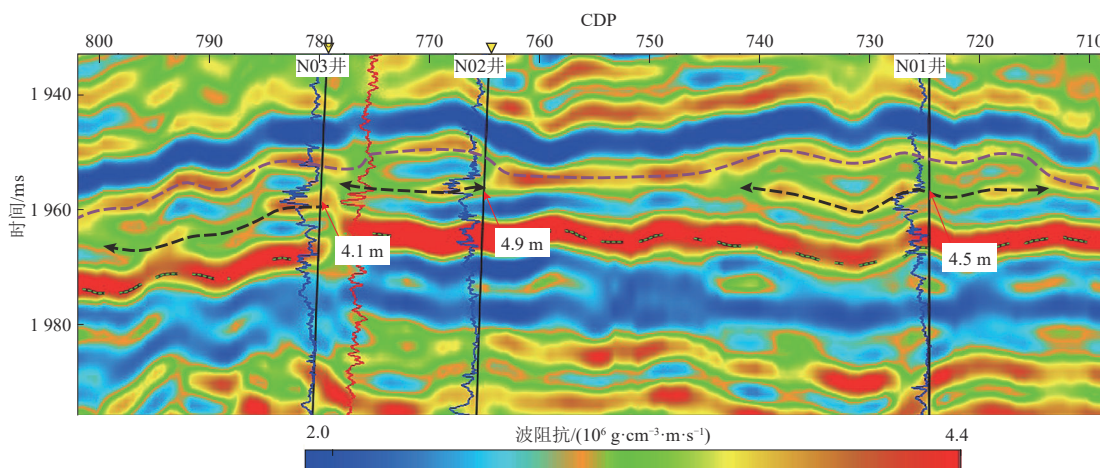


图17 安第斯14区块N油田东南部新钻井M1砂岩相控波形反演剖面

Fig. 17 Facies-controlled inversion profile of M1 of new wells in the southeast of N Oilfield in block 14 of the Andes

幅失真、消除高频的冗余谐波等方面仍需持续技术攻关。同时,地震子波恢复技术、全频带信号能量恢复与重构技术、去伪存真的分析技术或质控技术等算法的优化仍是目前的研究重点。

在通过改进反演方法识别超薄层方面,由于受地震分辨率限制,传统地质统计学反演预测的薄层信息依赖约束点的线性插值,约束点非均匀分布会导致反演随机性增强,致使薄层的精准表征能力变差。基于波形约束相控反演,可借助高分辨率地震波形约束进一步提高测井沉积层序与反射波组之间的非线性映射精度,减弱非均匀约束点的影响、降低测井高频曲线的插值权重。实际应用中,反演结果的可靠性除了受子波、层位与井信息、反演算法等影响之外,依然受地震有效频宽之外的低频和高频信息影响,因此如何构建有效的高/低频模型,寻找更优的算法降低薄层反演不确定性,仍是薄层地震反演的研究重点。另外,地震

属性在储层识别方面起着重要作用,如何将地震属性与反演结合起来增加薄层预测的可靠性也是未来的重点研究方向。

电磁地震数据融合技术也是近年来薄层预测的一个重要研究方向,将高分辨率的电磁地震数据和传统地震数据有效融合,能更好地分辨地震波特征,提高超薄层预测准确性。

随着地震宽频采集技术和人工智能等新技术的引入,地震处理和薄层反演技术方法将日趋完善。

5 结论

1) 针对安第斯多工区叠后地震数据,采用趋势面驱动的方法进一步完善了叠后一致性处理技术,消除了多工区相位、能量、频率及闭合差等对薄层反射的干扰,可有效提高资料解释效率与储层预测的精度。创

新提出了基于无井驱动的“稳态变时频子波”叠后高分辨率处理技术,实践证明其可有效恢复薄层弱反射系数,定性识别小于5 m厚的砂岩反射。

2) 提出的基于时-频衰减高精度合成记录标定方法,能够消除累积时差、精确定位和解剖薄层反射特征;同时,在精细标定下,采用宽频地震约束的相控反演方法,定量预测了3 000 m埋深、2~5 m厚的潮汐水道砂岩,预测准确率90%以上,形成了一套有效的超薄砂岩储层综合预测技术和方法。

参 考 文 献

- [1] 李庆忠. 地震高分辨率勘探中的误区与对策[J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(6): 751-783, 890.
LI Qingzhong. Some mistaken concepts in high-resolution seismic exploration and the corresponding countermeasures [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1997, 32(6): 751-783, 890.
- [2] 赵殿栋, 郑泽继, 吕公河, 等. 高分辨率地震勘探采集技术[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(3): 263-271.
ZHAO Diandong, ZHENG Zeji, LYU Gonghe, et al. Seismic acquisition technique for high-resolution [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2001, 36(3): 263-271.
- [3] 王清振, 姜秀娣, 翁斌, 等. 基于变时窗 Gabor 变换的高分辨率处理技术研究与应用[J]. 中国海上油气, 2015, 27(6): 19-26.
WANG Qingzhen, JIANG Xiudi, WENG Bin, et al. Research and application of high resolution technique based on Gabor transform with variable time window [J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(6): 19-26.
- [4] 张琳琳, 明君, 夏同星, 等. 井控层控 Q 参数建模技术在渤海地震资料高分辨率处理中的应用[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(6): 2435-2440.
ZHANG Linlin, MING Jun, XIA Tongxing, et al. Application of well-control and strata-bound Q-parameter modeling in Bohai seismic high-resolution processing [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(6): 2435-2440.
- [5] 李佳欣, 杨春, 王赞. 薄互层等效各向异性的研究现状与存在问题[J]. 石油物探, 2021, 60(2): 224-237.
LI Jiaxin, YANG Chun, WANG Yun. A state of the art on the equivalent anisotropy of thin interbeds [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(2): 224-237.
- [6] 胡永泉, 黄建波, 田志华, 等. 基于单道 SVD 和振幅比的地面微地震资料去噪方法[J]. 石油物探, 2019, 58(1): 43-52, 62.
HU Yongquan, HUANG Jianbo, TIAN Zhihua, et al. Ground microseismic data denoising based on single-channel singular value decomposition and amplitude ratio [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(1): 43-52, 62.
- [7] 马继涛, 王建花, 刘国昌. 基于频率域奇异值分解的地震数据插值去噪方法研究[J]. 石油物探, 2016, 55(2): 205-213.
MA Jitao, WANG Jianhua, LIU Guochang. Seismic data noise attenuation and interpolation using singular value decomposition in frequency domain [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(2): 205-213.
- [8] GUO Kanghui, LABATE D. Optimally sparse multidimensional representation using shearlets [J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 2007, 39(1): 298-318.
- [9] WANG Enning, NEALON J. Applying machine learning to 3D seismic image denoising and enhancement [J]. Interpretation, 2019, 7(3): SE131-SE139.
- [10] 李波, 文晓涛, 张懿疆, 等. 基于 Lucy-Richardson 算法和广义 S 变换的 Q 值提取[J]. 石油物探, 2019, 58(5): 689-699, 708.
LI Bo, WEN Xiaotao, ZHANG Yijiang, et al. Combined generalized S transform and Lucy-Richardson algorithm for Q-value extraction [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(5): 689-699, 708.
- [11] 蒋立, 陈勇, 肖艳玲, 等. 地表过渡带近地表 Q 补偿与地表一致性反褶积处理效果对比研究[J]. 石油物探, 2018, 57(6): 870-877.
JIANG Li, CHEN Yong, XIAO Yanling, et al. A comparison of near-surface Q compensation and surface-consistent deconvolution in the near-surface transition zone [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(6): 870-877.
- [12] 王小杰, 栾锡武. 基于小波分频技术的地层 Q 值补偿方法研究[J]. 石油物探, 2017, 56(2): 203-209.
WANG Xiaojie, LUAN Xiwu. The study of formation Q value compensation method based on wavelet frequency division technology [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(2): 203-209.
- [13] 李晓峰, 潘龙, 杨晓海, 等. 准噶尔腹部沙漠区地震资料宽频处理关键技术及应用效果[J]. 石油物探, 2021, 60(3): 430-437.
LI Xiaofeng, PAN Long, YANG Xiaohai, et al. Key technique for broadband processing of seismic data in a desert area in the middle of the Junggar Basin, China [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(3): 430-437.
- [14] 李拥军, 宋炜, 唐传章, 等. 复数域匹配追踪近地表 Q 值估计及深度学习建模[J]. 石油物探, 2021, 60(1): 123-135.
LI Yongjun, SONG Wei, TANG Chuazhang, et al. Complex domain-matching pursuit for near-surface Q-estimate and deep learning modeling [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(1): 123-135.
- [15] 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 Jiang, TU Guotian, WANG Jie. High-resolution seismic bidirectional frequency extension based on carrier modulation [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(6): 954-963.
- [16] 江雨濛, 曹思远, 陈思远, 等. 基于二阶自适应同步挤压 S 变换的时变子波提取方法[J]. 石油物探, 2021, 60(5):

- 721-731.
- JIANG Yumeng, CAO Siyuan, CHEN Siyuan, et al. Time-varying wavelet estimation method based on second-order adaptive synchro-squeezing S transform [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2021, 60(5): 721-731.
- [17] 王承曙, 张裕平. 自适应的最小平方反褶积及在地震勘探中的应用[J]. *地球物理学报*, 1987, 30(3): 307-317.
- WANG Chengshu, ZHANG Yuping. Adaptive least square deconvolution and application to seismic prospecting [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1987, 30(3): 307-317.
- [18] LEINBACH J. Wiener spiking deconvolution and minimum-phase wavelets: A tutorial [J]. *The Leading Edge*, 1995, 14(3): 189-192.
- [19] 王君, 周兴元, 曹孟起. 同态反褶积的改进与应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2003, 38(S1): 27-30.
- WANG Jun, ZHOU Xingyuan, CAO Mengqi. Improvement and application of homomorphic deconvolution [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2003, 38(S1): 27-30.
- [20] HARGREAVES N D, CALVERT A J. Inverse Q filtering by Fourier transform [J]. *Geophysics*, 1991, 56(4): 519-527.
- [21] CHAKRABORTY A, OKAYA D. Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods [J]. *Geophysics*, 1995, 60(6): 1906-1916.
- [22] RODRIGUEZ I V, BONAR D, SACCHI M D. Microseismic record de-noising using a sparse time-frequency transform [M]// Anon. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2011: 1693-1698.
- [23] 崔少华, 方振国, 王江涛, 等. 基于小波变换的地震数据去噪的研究[J]. *曲阜师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 44(3): 54-58.
- CUI Shaohua, FANG Zhenguo, WANG Jiangtao, et al. Research on seismic data denoising based on wavelet transform [J]. *Journal of Qufu Normal University (Natural Science)*, 2018, 44(3): 54-58.
- [24] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: The S transform [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(4): 998-1001.
- [25] PINNEGAR C R, MANSINHA L. The S-transform with windows of arbitrary and varying shape [J]. *Geophysics*, 2003, 68(1): 381-385.
- [26] 高静怀, 陈文超, 李幼铭, 等. 广义S变换与薄互层地震响应分析[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(4): 526-532.
- GAO Jinghuai, CHEN Wenchao, LI Youming, et al. Generalized S transform and seismic response analysis of thin interbeds [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(4): 526-532.
- [27] 黄捍东, 冯娜, 王彦超, 等. 广义S变换地震高分辨率处理方法研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(1): 82-88, 302.
- HUANG Handong, FENG Na, WANG Yanchao, et al. High-resolution seismic processing based on generalized S transform [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(1): 82-88, 302.
- [28] PURYEAR C I, CASTAGNA J P. Layer-thickness determination and stratigraphic interpretation using spectral inversion: Theory and application [J]. *Geophysics*, 2008, 73(2): R37-R48.
- [29] 杜斌山, 贺振华, 曹正林, 等. 地震地质多信息融合的井震标定方法研究[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(2): 254-257.
- DU Binshan, HE Zhenhua, CAO Zhenglin, et al. Well-to-seismic calibration method with multiple seismic geological information integrated [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(2): 254-257.
- [30] AL-DOSSARY S, WANG Jinsong. An improved Markov chain Monte Carlo approach for wavelet extraction [M]//SICKING C, FERGUSON J. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2016: 5187-5191.
- [31] 迟唤昭, 刘财, 单玄龙, 等. 谱反演方法在致密薄层砂体预测中的应用研究[J]. *石油物探*, 2015, 54(3): 337-344, 366.
- CHI Huanzhao, LIU Cai, SHAN Xuanlong, et al. Application of spectral inversion for tight thin-bed sand body prediction [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2015, 54(3): 337-344, 366.
- [32] 贾承造, 赵文智, 邹才能, 等. 岩性地层油气藏勘探研究的两项核心技术[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(3): 3-9.
- JIA Chengzao, ZHAO Wenzhi, ZOU Caineng, et al. Two key technologies about exploration of stratigraphic/lithological reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(3): 3-9.
- [33] 高君, 毕建军, 赵海山, 等. 地震波形指示反演薄储层预测技术及其应用[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(1): 142-145.
- GAO Jun, BI Jianjun, ZHAO Haishan, et al. Seismic waveform inversion technology and application of thinner reservoir prediction [J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(1): 142-145.
- [34] 魏敏, 李守济, 时秀朋, 等. 波形指示反演在准中庄3工区薄储层预测中的应用[J]. *石油物探*, 2021, 60(4): 643-651.
- WEI Min, LI Shouji, SHI Xiupeng, et al. Application of a seismic motion inversion method for thin reservoir prediction in the Zhuang-3 Block of the Central Junggar Basin [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2021, 60(4): 643-651.
- [35] 杨文采. 地震道的非线性混沌反演——I. 理论和数值试验[J]. *地球物理学报*, 1993, 36(2): 222-232.
- YANG Wencai. Nonlinear chaotic inversion of seismic traces: (I) Theory and numerical experiments [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1993, 36(2): 222-232.
- [36] 黄捍东, 罗群, 付艳, 等. 地震相控非线性随机反演研究与应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(6): 694-698.
- HUANG Handong, LUO Qun, FU Yan, et al. Study and application of seismic phase-controlled non-linear random inversion [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2007, 42(6): 694-698.
- [37] 马中振, 谢寅符, 陈和平, 等. 南美典型前陆盆地斜坡带油气成藏特征与勘探方向选择——以厄瓜多尔 Oriente 盆地 M 区块为例[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(3): 379-387.
- MA Zhongzhen, XIE Yinfu, CHEN Heping, et al. Hydrocarbon

- accumulation feature and exploration direction selection: Taking M block of Oriente Basin, Ecuador as an example [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(3): 379-387.
- [38] 李晓峰, 王晓涛, 林娟, 等. 一致性处理技术在准噶尔盆地三维连片处理中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(S2): 33-41.
- LI Xiaofeng, WANG Xiaotao, LIN Juan, et al. Consistent processing for 3D seismic data merging in Junggar Basin [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(S2): 33-41.
- [39] 陈浩, 刘喜武, 孟宪军. 地震叠后数据抽取中关键问题探讨[J]. *胜利油田职工大学学报*, 2008, 22(6): 41-42.
- CHEN Hao, LIU Xiwu, MENG Xianjun. Key issues in post-stack seismic data extraction [J]. *Journal of Shengli Oilfield Staff University*, 2008, 22(6): 41-42.
- [40] 敬兵, 潘文庆, 邓兴梁, 等. 三维地震叠后数据体拼接方法及装置: CN201410594012.1[P]. 2018-01-02.
- JING Bing, PAN Wenqing, DENG Xingliang, et al. Method and device for splicing data body after three-dimensional seismic stacking: CN201410594012.1[P]. 2018-01-02.
- [41] 龚洪林, 张虎权, 姚清洲, 等. 不同三维地震数据体的拼接方法及其装置: CN201510459489.3[P]. 2015-11-25.
- GONG Honglin, ZHANG Huquan, YAO Qingzhou, et al. Stitching method and device of different three-dimensional seismic data bodies: CN201510459489.3[P]. 2015-11-25.
- [42] 郭银玲, 刘能超, 彭苏萍, 等. 叠前地震数据拼接方法及装置: CN201910763081.3[P]. 2019-10-25.
- GUO Yinling, LIU Nengchao, PENG Suping, et al. Prestack seismic data stitching method and device: CN201910763081.3 [P]. 2019-10-25.
- [43] 葛永慧, 康志军. 加权移动趋势面拟合[J]. *工程图学学报*, 2008, 29(2): 110-115.
- GE Yonghui, KANG Zhijun. Weighted technology of moving trend surface fitting[J]. *Journal of Graphics*, 2008, 29(2): 110-115.
- [44] 管仁荣. 趋势面分析在地球物理勘探中的应用研究[J]. *中国矿业*, 2012, 21(S1): 474-478.
- Guan Renrong. The study of trend surface analysis [J]. *China Mining Magazine*, 2012, 21(S1): 474-478.
- [45] 孙学继, 杨晓. 合成地震记录制作方法研究[J]. *石油地球物理勘探*, 1997, 32(S2): 34-39, 189.
- SUN Xueji, YANG Xiao. Research on the production method of synthetic seismic records[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1997, 32(S2): 34-39, 189.
- [46] 孙振涛, 孟宪军, 慎国强, 等. 高精度合成地震记录制作技术研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2002, 37(6): 640-643.
- SUN Zhentao, MENG Xianjun, SHEN Guoqiang, et al. The technology of making high-precision synthetic seismogram[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2002, 37(6): 640-643.
- [47] 凌云研究组. 测井与地震信息标定研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2004, 39(1): 68-74.
- Ling Yun Research Group. Study of logging and seismic information labeling[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2004, 39(1): 68-74.
- [48] 靳玲, 苏桂芝, 刘桂兰, 等. 合成地震记录制作的影响因素及对策[J]. *石油物探*, 2004, 43(3): 267-271.
- JIN Ling, SU Guizhi, LIU Guilan, et al. Influencing factors in making synthetic seismogram and counter measures [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2004, 43(3): 267-271.
- [49] 宋建国, 李辉, 刘垒, 等. 合成地震记录制作中的质量控制方法研究[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(1): 176-182.
- SONG Jianguo, LI Hui, LIU Lei, et al. Quality control methods of synthetic seismograms [J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(1): 176-182.
- [50] 杨帅, 陈洪德, 王山山, 等. 精细井震分频标定及其特殊检验方法研究[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(29): 8561-8566.
- YANG Shuai, CHEN Hongde, WANG Shanshan, et al. The research of fine frequency division well-to-seismic calibration and special test method [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(29): 8561-8566.
- [51] 顾雯, 章雄, 徐敏, 等. 强屏蔽下薄储层高精度预测研究——以松辽盆地三肇凹陷为例[J]. *石油物探*, 2017, 56(3): 439-448.
- GU Wen, ZHANG Xiong, XU Min, et al. High precision prediction of thin reservoir under strong shielding effect and its application: A case study from Sanzhao Depression, Songliao Basin [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2017, 56(3): 439-448.
- [52] 张军华, 于虢野, 芦凤明, 等. 复杂断块油藏地震标定研究与新认识——以大港自来屯油田为例[J]. *石油物探*, 2022, 61(4): 647-658, 711.
- ZHANG Junhua, YU Xiaoye, LU Fengming, et al. Research and new acquaintance of seismic calibration for complex fault block reservoir: A case study from Zilaitun area of Dagang Oilfield [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(4): 647-658, 711.
- [53] 杜鑫, 张广智, 刘沛然. 两种反褶积技术应用效果的对比[J]. *石油物探*, 2021, 60(S1): 85-89.
- DU Xin, ZHANG Guangzhi, LIU Peiran. Comparison of two deconvolution methods [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2021, 60(S1): 85-89.
- [54] 王一惠, 王小卫, 张涛, 等. 西部沙漠区中深层地震数据近地表Q补偿应用研究[J]. *石油物探*, 2021, 60(6): 944-953.
- WANG Yihui, WANG Xiaowei, ZHANG Tao, et al. Application of near-surface Q compensation for seismic data from a mid-depth layer in the western desert in China [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2021, 60(6): 944-953.
- [55] 郭树祥, 李建明, 毕立飞, 等. 频率域地表一致性反褶积方法及应用效果分析[J]. *石油物探*, 2003, 42(1): 97-101.
- GUO Shuxiang, LI Jianming, BI Lifei, et al. Frequency domain surface-consistent deconvolution and its application [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2003, 42(1): 97-101.
- [56] 颜中辉, 方刚, 徐华宁, 等. 希尔伯特谱白化方法在海洋地震

- 资料高分辨率处理中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(4): 212-220.
- YAN Zhonghui, FANG Gang, XU Huaning, et al. The application of Hilbert spectral whitening method to high resolution processing of marine seismic data [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(4): 212-220.
- [57] 张全, 王一品, 张伟, 等. 地震波能量补偿的并行反Q滤波方法研究[J/OL]. 西南石油大学学报(自然科学版): 1-9[2023-01-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20230105.2120.003.html>.
- ZHANG Quan, WANG Yipin, ZHANG Wei, et al. Research on parallel inverse Q filtering methods for seismic wave energy compensation [J/OL]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition): 1-9[2023-01-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20230105.2120.003.html>.
- [58] 赵岩, 毛宁波, 陈旭. 基于时频域信噪比的自适应增益限反Q滤波方法[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(4): 85-92.
- ZHAO Yan, MAO Ningbo, CHEN Xu. Self-adaptive gain-limit inverse Q filtering method based on Snr in time-frequency domain [J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(4): 85-92.
- [59] 郭志伟, 曹思远, 袁殿. 时空变自适应反Q滤波[J]. 石油科学通报, 2019, 4(2): 123-133.
- GUO Zhiwei, CAO Siyuan, YUAN Dian. Time-space variant adaptive inverse Q filtering [J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 4(2): 123-133.
- [60] 陈祖庆, 王静波. 基于压缩感知的稀疏脉冲反射系数谱反演方法研究[J]. 石油物探, 2015, 54(4): 459-466.
- CHEN Zuqing, WANG Jingbo. A spectral inversion method of sparse-spike reflection coefficients based on compressed sensing [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(4): 459-466.
- [61] 戴前伟, 丁浩, 张华, 等. 基于变分模态分解和奇异谱分析的GPR信号去噪[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(3): 701-712.
- DAI Qianwei, DING Hao, ZHANG Hua, et al. Noise reduction method of GPR signal based on VMD-SSA [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3): 701-712.
- [62] 乔云, 李琼, 钱浩东, 等. 基于VMD与改进小波阈值的地震信号去噪方法研究[J]. 物探化探计算技术, 2021, 43(6): 690-696.
- QIAO Yun, LI Qiong, QIAN Haodong, et al. Seismic signal denoising method based on VMD and improved wavelet threshold [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 43(6): 690-696.
- [63] 孙小东, 王伟奇, 任丽娟, 等. 地震数据智能去噪与传统去噪方法的对比及展望[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(6): 2211-2219.
- SUN Xiaodong, WANG Weiqi, REN Lijuan, et al. Comparison and prospect on AI denoising of seismic data along with traditional denoising methods [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(6): 2211-2219.
- [64] 欧阳敏, 王大为, 李志娜, 等. 基于压缩感知的小波阈值和CEEMD联合去噪方法[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(2): 615-621.
- OUYANG Min, WANG Dawei, LI Zhina, et al. Research on CEEMD and wavelet threshold jointed denoising based on compressed sensing [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(2): 615-621.
- [65] 张珩, 王建立, 李文滨, 等. 基于压缩感知和反演理论的储层预测研究[J]. 石油物探, 2022, 61(6): 1028-1034.
- ZHANG Heng, WANG Jianli, LI Wenbin, et al. Reservoir prediction based on compressed sensing and inversion theory [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(6): 1028-1034.
- [66] 朱相羽, 郭廷超, 曹文俊, 等. 基于反射系数反演提高地震资料分辨率[J]. 石油物探, 2022, 61(6): 985-993.
- ZHU Xiangyu, GUO Tingchao, CAO Wenjun, et al. A seismic resolution improvement method based on reflection coefficient inversion [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(6): 985-993.
- [67] 黄捍东, 张建军, 刘伟, 等. 地震相控混沌反演在岩性油气藏储层预测中的应用——以RY坳陷M井区为例[J]. CT理论与应用研究, 2019, 28(5): 549-557.
- HUANG Handong, ZHANG Jianjun, LIU Wei, et al. Application of chaos inversion controlled by seismic facies in prediction of lithologic reservoirs: A case study of M Well area in RY depression [J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2019, 28(5): 549-557.
- [68] 黄捍东, 张如伟, 魏世平. 地震非线性随机反演方法在陆相薄砂岩储层预测中的应用[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 386-390.
- HUANG Handong, ZHANG Ruwei, WEI Shiping. Research on application of seismic nonlinear random inversion to reservoir prediction in the thin sandstone of continental deposits [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 386-390.
- [69] 高君, 黄捍东, 季敏, 等. 碳酸盐岩储层地震相控非线性反演技术及应用[J]. 石油物探, 2020, 59(3): 396-403.
- GAO Jun, HUANG Handong, JI Min, et al. Seismic phase-controlled nonlinear inversion of a carbonate reservoir [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(3): 396-403.
- [70] 尹彬, 胡祥云. 非线性反演的贝叶斯方法研究综述[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(3): 1027-1032.
- YIN Bin, HU Xiangyun. Overview of nonlinear inversion using Bayesian method [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(3): 1027-1032.

(编辑 张亚雄)