

基于 L_{1-2} 范数的时移波阻抗反演方法

李文瑾^{1,2}, 李景叶^{1,2*}, 王永平^{1,2}

1 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球物理学院, 北京 102249

* 通信作者, lijingye@cup.edu.cn

收稿日期: 2024-07-29; 修回日期: 2024-11-11

国家重点研发计划“二氧化碳强化油藏开采与地质储集一体化关键技术及应用示范”(2022YFE0206700)项目资助

摘要 超临界 CO_2 注入到地下储集空间后会引发封存空间属性的强烈变化, 此时会在叠后时移地震数据上表现出明显的时移响应信息。时移波阻抗反演是利用叠后时移差异数据计算差异波阻抗, 识别储层变化的一种有效方法。储层参数变化通常是局部性的, 因此差异波阻抗通常会表现出明显的块状特征, 即差异波阻抗反射率具有稀疏性质。常规时移波阻抗反演方法中使用的 L_2 或 L_1 正则化约束项的稀疏性不足, 导致对于时移差异的边界刻画不清晰的问题。本文提出将具有更加稀疏特性的 L_{1-2} 范数作为先验约束条件加入差异波阻抗反演中以增强反演结果在阻抗界面处的刻画清晰程度。通过模型测试分析, L_{1-2} 范数约束相比 L_1 范数和 L_2 范数在垂向上具有最高的反演分辨率。同时为了克服采用单道反演方法可能造成的反演结果横向连续性差的问题, 本文引用 $f-x$ 滤波方法对结果进行改善。本文方法应用于模型数据和挪威 Sleipner 深部咸水层 CO_2 地质封存的结果表明, 基于 L_{1-2} 范数约束的时移波阻抗反演方法能够有效且精确地表征时移地震差异响应, 可以用作 CO_2 地质封存监测的一种手段。

关键词 差异反演; L_{1-2} 范数; 贝叶斯框架; CO_2 地质封存; 稀疏

中图分类号: P631.4; P618.13

Time-lapse impedance inversion based on L_{1-2} norm

LI Wenjin^{1,2}, LI Jingye^{1,2}, WANG Yongping^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 College of Geophysics, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Received: 2024-07-29; Revised: 2024-11-11

Abstract Injecting supercritical CO_2 into underground reservoir space significantly alters the properties of the sequestered area, resulting in obvious time-lapse responses on post-stack seismic data. Time-lapse wave impedance inversion is an effective method to identify reservoir changes by calculating differential wave impedance with post-stack time-lapse differential data. Since reservoir parameters lapse are usually localized, the differential wave impedance often displays clear, block-like features, meaning that the reflectivity of differential wave impedance tends to exhibit sparsity. And due to the insufficient sparsity of the L_2 or L_1 regularization constraint term used in the conventional time-lapse wave impedance inversion method, it results in the problem of unclear boundary delineation in time-lapse difference imaging. In this paper, we propose to add L_{1-2} norms with stronger

引用格式: 李文瑾, 李景叶, 王永平. 基于 L_{1-2} 范数的时移波阻抗反演方法. 石油科学通报, 2024, 09(06): 921-930

LI Wenjin, LI Jingye, WANG Yongping. Time-lapse impedance inversion based on L_{1-2} norm. Petroleum Science Bulletin, 2024, 09(06): 921-930. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.06.071

sparsity-promoting characteristics as a prior constraint into the differential wave impedance inversion to enhance the clarity of the inversion results at the boundary clarity. The L_{1-2} norm constraint improves the sharpness of the inversion results, especially at impedance interfaces. Through model testing and analysis, it is found that the L_{1-2} norm constraint provides the highest inversion resolution in the vertical direction when compared to L_1 and L_2 norms. Additionally, in order to overcome the problem of poor transverse continuity of the inversion results that may be caused by using the single-channel inversion method, this paper adopts the $f-x$ filtering method for result enhancement. By applying the proposed method to the model data and the CO_2 geological storage data in the deep saline layer of Sleipner, Norway, it is shown that the time-lapse wave impedance inversion method based on the constraints of L_{1-2} norms can characterize the time-lapse seismic differential response efficiently and accurately, and it can be used as a means to monitor the CO_2 geological storage.

Keywords difference inversion; L_{1-2} norm; Bayesian framework; CO_2 geological storage; sparse

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.06.071

0 引言

储层参数变化通常发生在油气开采一段时间, 或向储层注入新的流体以驱替原始储集流体(如 CO_2 驱替)^[1-3], 通过在不同时间进行相同方式的地震采集获取这种储层参数变化的过程就是时移地震反演技术^[4-6]。

叠后时移地震反演^[7-11]是利用不同期的叠后地震数据计算波阻抗的差异, 起初为了从时移地震数据中获取波阻抗差异, 学者通过波阻抗反演方法分别求取两组波阻抗数据, 再通过做差求取波阻抗差异。通过一步法直接计算波阻抗的差异反演, 由于省去了中间计算误差, 拥有更准确的反演精度, 并且已经在实际生产领域得到广泛应用^[12-14]。

近年来, 学者们将叠后差异阻抗反演的研究重点逐渐转移到提高反演分辨率上, 同时提出了许多改进的算法。贝叶斯框架^[15-17]通过增加确定的先验信息以提高反演结果的稳定性和准确性, 通过测井信息对反演参数进行统计并确定其分布形式, 学者们提出了多种先验分布形式: 高斯先验分布(L_2), L_1 先验分布^[18-19], 微分拉普拉斯分布, 以及 L_{1-2} 范数^[20-23]等。不同的模型参数分布会使得反演结果趋近于某种特征, 例如使用 L_2 范数进行约束时通常会得到比较光滑的反演参数, 而使用稀疏约束(例如 L_1 , L_{1-2})则会得到更加高频的反演结果。

由于时移地震的变化通常是局部发生的, 即在一段时间内的储层参数变化是有限的, 因此时移差异阻抗一般具有明显的块状特征^[24-25], 在纵向上, 差异阻抗的反射率就具有明显的稀疏性质。针对这种特性, 我们提出将更具稀疏性质的 L_{1-2} 范数约束作为先验分布加入到差异波阻抗反演过程中, 以此提高反演结果的纵向分辨能力, 同时, 我们也以 L_2 和 L_1 范数作为

对比以论证 L_{1-2} 范数约束的优越性。由于我们采用的反演方法应用于单道计算, 为了增强道与道之间的横向连续性, 我们引入 $f-x$ 空间滤波方法^[26-27]对反演结果进行改善。

1 方法原理

1.1 叠后时移波阻抗正演

叠后地震数据正演^[22]可以表示为地震子波与波阻抗反射率的褶积, 其中波阻抗反射率为:

$$r_i = \frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i}, \quad (1)$$

其中, Z 表示地震纵波阻抗, i 表示地层连续界面的第 i 层。为了构建地震振幅与波阻抗的线性关系, 利用等价无穷小替换的思想($e^x \approx 1+x$)可以将式(1)变形为以下形式:

$$r = \frac{1}{2} \mathbf{D} \ln(Z), \quad (2)$$

其中, \mathbf{D} 表示一阶差分算子: $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & & & \\ & -1 & 1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & -1 & 1 \end{bmatrix}_{(n,n+1)}$,

n 表示第 n 个反射界面。公式(2)可以理解为, 每个波阻抗界面位置的反射率可以用界面两侧波阻抗的对数做差得到。将公式(2)带入褶积理论, 叠后合成地震记录可以表示为:

$$\mathbf{d} = \mathbf{W}\mathbf{R} + \mathbf{n}_e \quad (3)$$

其中, \mathbf{d} 表示叠后地震记录, \mathbf{W} 表示叠后地震子波的 Toeplitz 矩阵形式, $\mathbf{R} = [\ln(Z_{i1}), \ln(Z_{i2}), \dots, \ln(Z_{in})]^T$ 表示反射系数序列, \mathbf{n}_e 表示噪声, 可以理解为实际观测

数据与合成数据的残差。基于公式(3)的推导,假设不同时期采集的叠后地震数据分别可以表示为:

$$\begin{aligned} d_1 &= W_1 R_1 + n_{e1} \\ d_2 &= W_2 R_2 + n_{e2} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,下标 1, 2 分别对应时移地震的基础数据和监测数据。假设通过互均衡处理后消除了时移地震数据的子波差异,那么将公式(4)中的数据相减可以得到以下形式:

$$\Delta d = d_2 - d_1 \approx WD \left[\ln \left(\frac{\Delta Z}{Z_1} + 1 \right) \right] + \Delta n_e \quad (5)$$

其中, ΔZ 表示两期地震数据对应的波阻抗差异, Δn_e 表示四维噪声。假设 $\Delta m = \ln \left(\frac{\Delta Z}{Z_1} + 1 \right)$, 由此可以建立叠后时移波阻抗的正演关系式为:

$$\Delta d = WD \Delta m + n_e \quad (6)$$

1.2 基于贝叶斯框架的时移波阻抗反演

地震反演问题通常是不适定^[27-29]的,解决办法之一是增加更多的先验信息以提升反演的稳定性。基于贝叶斯框架,我们可以将测井数据作为先验模型代入地震反演。假设地震反演后验概率与似然函数和先验函数的乘积正相关:

$$P(m|d) \propto P(d|m)P(m) \quad (7)$$

其中, $P(m|d)$ 表示后验概率。假设公式(6)中的噪声服从高斯分布,结合公式(6)后验概率可以表示为:

$$\begin{aligned} P(\Delta d|\Delta m) &\propto \\ \exp \left(-\frac{1}{2C_d} (\Delta d - WD \Delta m)^T (\Delta d - WD \Delta m) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, C_d 表示噪声的协方差矩阵。先验函数可以分为两个部分: ①利用低频模型控制参数反演的趋势; ②针对反演参数的分布特征选择合适的分布约束。常用的分布约束包括高斯约束分布 (L_2), L_1 约束分布以及 L_{1-2} 范数等,假设先验函数可以表示为以下形式:

$$\begin{aligned} P(\Delta m) &\propto \\ \exp \left(-\frac{1}{2} \lambda (\Delta m - \Delta m_0)^T (\Delta m - \Delta m_0) - \mu R(\Delta m) \right) \end{aligned} \quad (9)$$

指数中的第一项为上述低频模型约束, Δm_0 表示参考阻抗差异, λ, μ 表示正则化项的权重, $R(\Delta m)$ 根据参数的分布差异可以表示为:

$$R(\Delta m) = \begin{cases} \sqrt{\left(\sum_j (\Delta m_j)^2 \right)}, (L_2) \\ \left(\sum_j \text{abs}(\Delta m_j) \right), (L_1) \\ \left(\sum_j \text{abs}(\Delta m_j) \right) - \sqrt{\left(\sum_j (\Delta m_j)^2 \right)}, (L_{1-2}) \end{cases}, \quad (10)$$

高斯约束分布 (L_2) 通常会计算得到一个相对光滑的结果, L_1 约束分布和 L_{1-2} 范数则会使反演结果更加稀疏,从而得到更高的分辨率。基于不同的正则化约束,将公式(8)~公式(10)代入公式(7),并取指数项的最小值(后验概率的最大值)便可得到相应的反演目标函数:

$$\begin{aligned} J(\Delta m) &= \frac{1}{2} \|\Delta d - WD \Delta m\|_2^2 + \\ &\frac{1}{2} \|\Delta m - \Delta m_0\|_2^2 + \lambda R(D \Delta m) \end{aligned}, \quad (11)$$

对于公式(11)的求解,当采用 L_2 范数进行约束时,可以直接通过线性方程求解方法直接计算 Δm , 当采用 L_1 或者 L_{1-2} 范数约束时,耿^[22]等(2022)采用迭代重加权最小二乘算法对目标函数进行求解。在反演计算出 Δm 后,我们再通过公式(5)计算时移差异波阻抗:

$$\Delta Z = (e^{\Delta m} - 1) Z_1 \quad (12)$$

因此,时移波阻抗的反演过程为:

- 1) 计算基线数据的波阻抗 Z_1 , 并由公式(5)计算 Δm 。
- 2) 设置正则化参数,对测井数据的插值结果进行低通滤波处理计算 Δm_0 。
- 3) 将 Δm_0 代入反演方程进行迭代求解,并计算反演数据的正演计算结果与观测数据的残差。
- 4) 当第 k 次的反演结果 Δm^k 的正演结果收敛于观测数据,则输出当前计算结果。否则,进行第 $k+1$ 次迭代计算。

2 模型测试

为了测试上述方法的有效性,我们采用一组合成数据对反演方法进行测试。模型合成数据来源于 Marmousi2 模型中的一部分,如图 1a 和 1b 所示分别为时移地震两期波阻抗,图 1c 为二者的差异。叠后地震正演采用主频为 40 Hz 的雷克子波与图 1a 和 1b

褶积计算, 合成地震如图 2a 所示。图 1d~f 分别为使用 L_1 范数, $L_{1,2}$ 范数和 L_2 范数时的反演结果, 从图中可以看出, 在纵向的反演能力上, L_1 与 $L_{1,2}$ 均要优于 L_2 范数, L_2 范数约束无法精细刻画阻抗边界, 从而反映出较多假象 (如图 1f 框内)。由于本方法应用为单道反演, 在应用于不同地震道反演时可能会造成反演效果的差异, 从而造成横向的不连续性。因此, 我们采用 $f-x$ 滤波的方法以增加反演结果的横向连续性。图 1g~i 展示了 $f-x$ 滤波后的结果, 与滤波前的数据相比, L_1 范数和 L_2 范数的反演结果在横向上更加连续, $L_{1,2}$ 相对并不明显这是由于滤波前的反演精度已经足够高。

进一步我们对图 2 左所示的数据添加信噪比为 3 的高斯噪声以验证方法在含噪时的反演稳定性, 含噪地震数据如图 2 右所示。使用同样的方法我们计算的结果如图 3 所示, 其中, 图 3a~c 分别为 L_1 , $L_{1,2}$, L_2 范数约束的时移阻抗反演结果, 从结果可以看出, 由于地震噪声的存在使得反演结果的稳定性有所降低, 出现了明显的“挂面条现象”, 但是相比之下, $L_{1,2}$ 范数的反演结果精度要明显高于另外二者。同理, 我们对反演结果进行 $f-x$ 滤波以增加横向连续性, 如图 3d~f 所示, $L_{1,2}$ 范数的反演结果经过 $f-x$ 滤波后基本得到了精确的阻抗差异 (图 3e), 其次是 L_1 范数, L_2 范数的效果最差。

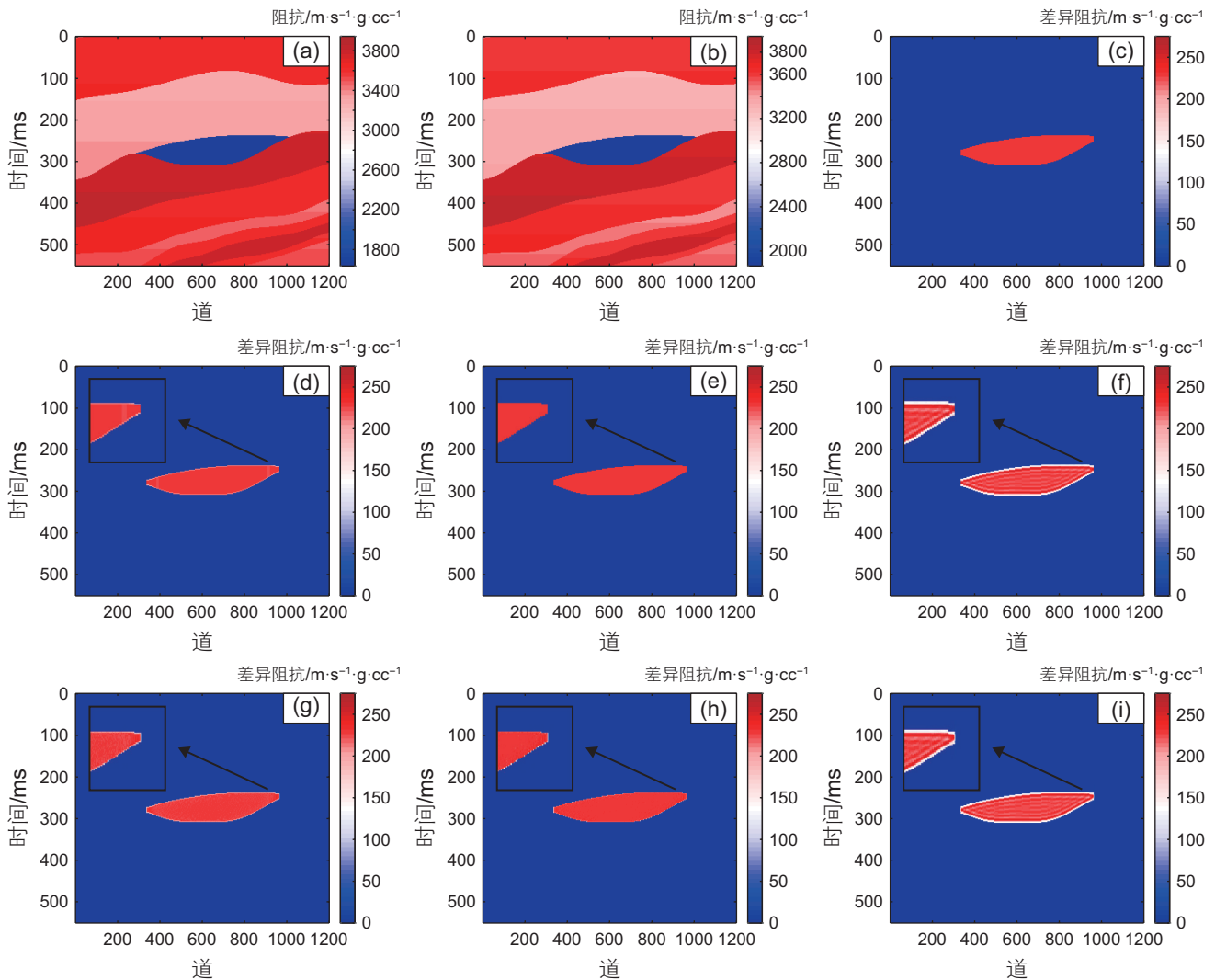


图 1 真实阻抗模型及不同约束的反演结果 (a) 基础模型; (b) 监测模型; (c) 差异模型; (d)~(f) $f-x$ 滤波前的 L_1 , $L_{1,2}$, L_2 约束的反演结果; (g)~(i) $f-x$ 滤波后的 L_1 , $L_{1,2}$, L_2 约束的反演结果

Fig. 1 True impedance model and inversion results with different constraints (a) basic model; (b) monitoring model; (c) differential model; (d) the inversion results of L_1 , $L_{1,2}$, and L_2 constraints before $f-x$ filtering; (g) the inversion results of L_1 , $L_{1,2}$, and L_2 constraints after $f-x$ filtering

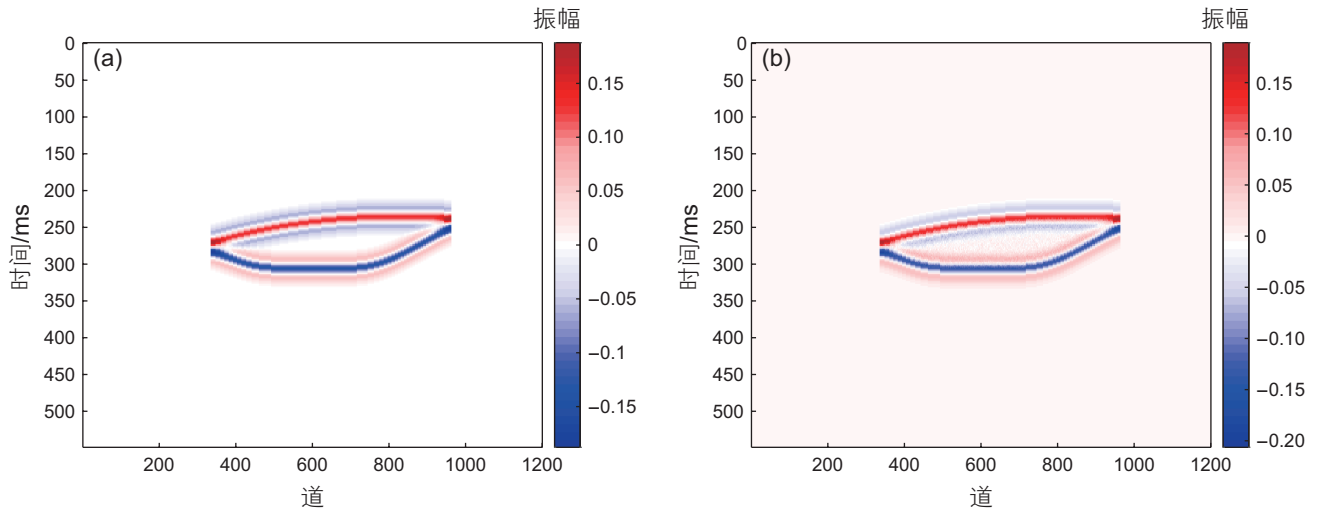


图 2 合成叠后地震数据 (a) 无噪合成数据; (b) 信噪比为 3 合成数据

Fig. 2 Post-stack seismic data (a) synthetic data with noise free; (b) synthetic data with SNR = 3

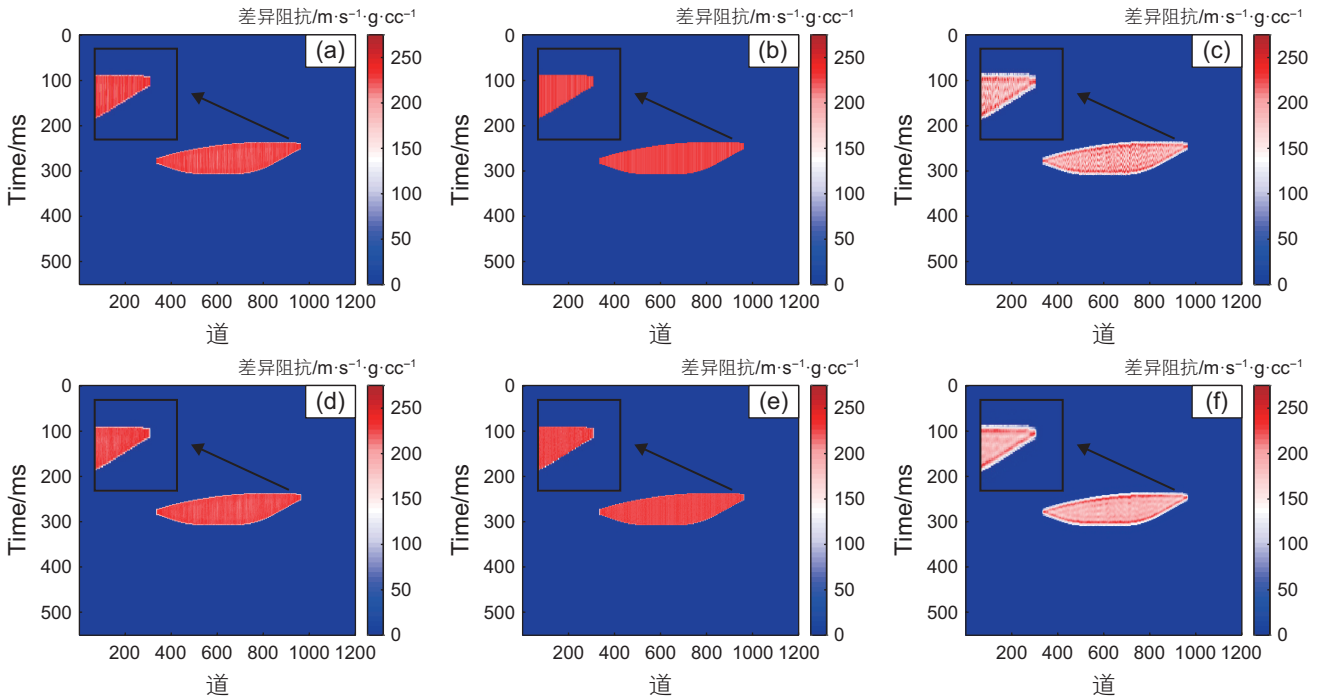


图 3 不同约束时移波阻抗反演结果 (SNR=3) (a)~(c) $f-x$ 滤波前 L_1 , L_{1-2} , L_2 约束时移波阻抗反演结果; (d)~(f) $f-x$ 滤波后 L_1 , L_{1-2} , L_2 约束时移波阻抗反演结果

Fig. 3 The inversion results of impedance with different constraints (SNR=3) (a)~(c) the inversion results of L_1 , L_{1-2} , and L_2 constrained time lapse impedance before $f-x$ filtering; (d)~(f) the inversion results of L_1 , L_{1-2} , and L_2 constrained time lapse impedance after $f-x$ filtering

图 4 展示了图 1d-f 与图 3d-f 中第 600 道处的反演结果, 其中黑实线为真实阻抗差异模型, 红虚线为反演结果, 左列为无噪数据反演结果, 右列为含噪数据反演结果, 至上而下分别为 L_1 , L_{1-2} , L_2 范数约束的反演结果。从图中可以明显的看出, L_2 范数在阻抗边界处几乎不能反映真实的结果, 相比之下, L_1 范数的边界刻

画更加精细, 但仍然与真实模型存在误差, L_{1-2} 范数则与真实模型的拟合度最高, 拥有最高的纵向反演分辨率。结合 $f-x$ 滤波的横向优化效果, 综合来看, 基于 L_{1-2} 范数的反演结果能够预测出最精确的时移波阻抗。基于以上模拟测试, 下一节中, 我们主要利用 L_{1-2} 范数进行实际工区的时移波阻抗反演预测。

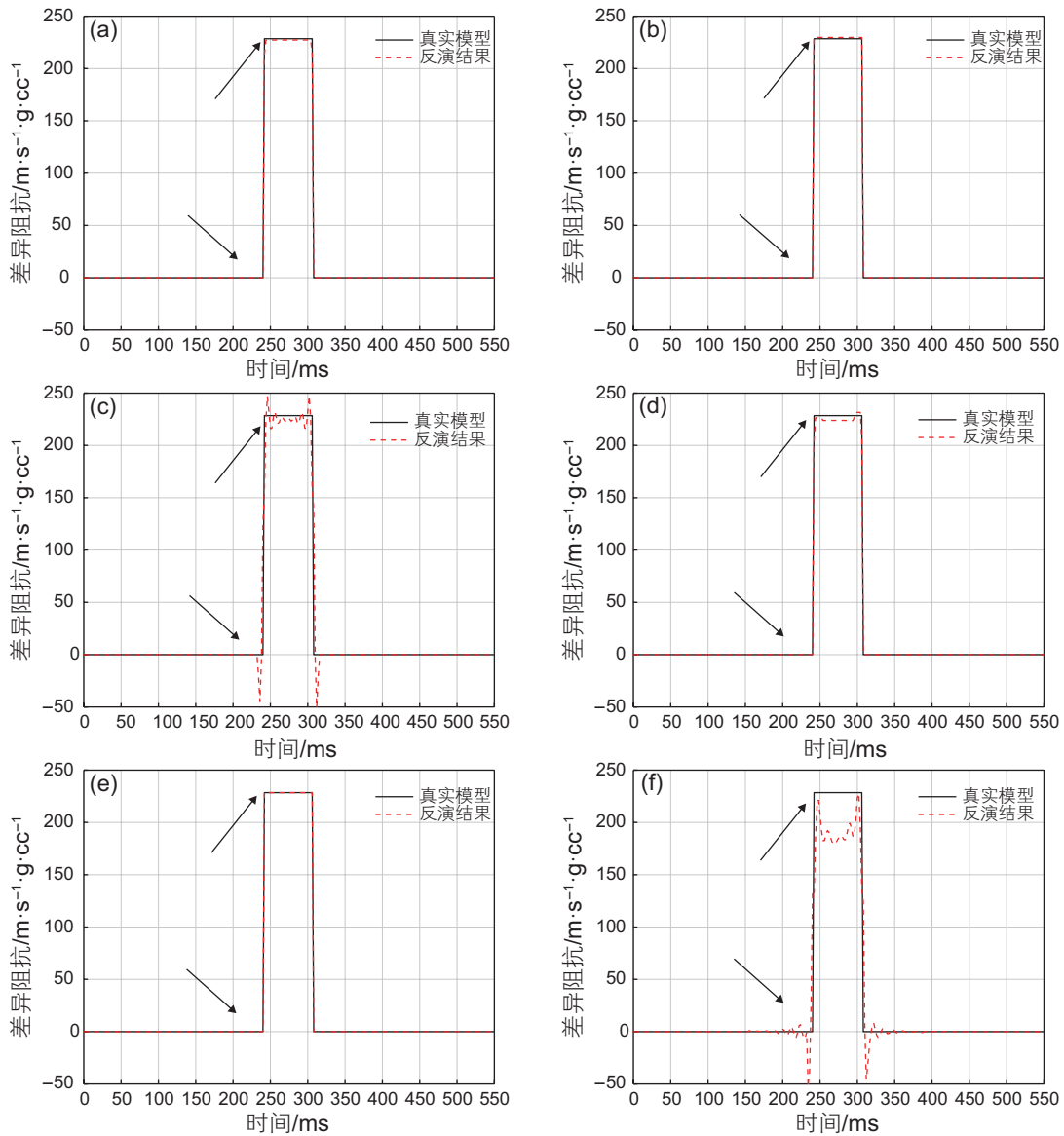


图 4 不同约束反演结果第 600 道 (a)~(c) L_1 , $L_{1,2}$, L_2 约束无噪反演结果;(d)~(f) L_1 , $L_{1,2}$, L_2 约束的含噪反演结果

Fig. 4 The 600th inversion result with different constraints (a)~(c) L_1 , $L_{1,2}$, L_2 constrained noiseless inversion results with noise free; (d)~(f) L_1 , $L_{1,2}$, L_2 constrained inversion results with noise

3 实际资料测试

本节中,我们将方法应用于挪威 Sleipner 深部咸水层 CO_2 地质封存^[29-30]样点计算其时移波阻抗值。Sleipner 于 1999 年开始进行 CO_2 地质封存,主要封存深度为 800~1000 m 的 Utsira 砂岩,砂体整体孔隙率达到 20%,具有十分优越的储集条件。顶部覆盖了厚度约为 50 m 的泥岩盖层,砂体内部横向发育了数个低渗透薄泥岩,可以作为 CO_2 运移过程中的物理阻挡,防止 CO_2 的泄露。

Sleipner 深部咸水层 CO_2 地质封存具有多期地震

数据进行 CO_2 运移的监测,我们分别选择了 1994 年和 2006 年采集的两次数据作为时移地震的基础数据和监测数据(1994 年采集数据为开始注 CO_2 前的勘探数据和监测数据)。如图 5 所示,5a 为叠后基础数据,5b 为监测数据,其中,Well-A 为 CO_2 注入井,其位置位于封存位置以外,在水平段(虚线位置)注入到封存点的底部。从叠后数据中可以清楚的看到,在厚泥质盖层下部(约 900~1000 ms)处产生了明显的振幅变化。

首先需要获取基础数据的波阻抗 Z_1 ,我们采用文献[22]中的波阻抗反演方法进行单期的波阻抗反演,如图 6 所示分别为基础数据的波阻抗低频模型(a), $L_{1,2}$ 约束的反演结果(b)以及井反演结果(c)。从图 6c

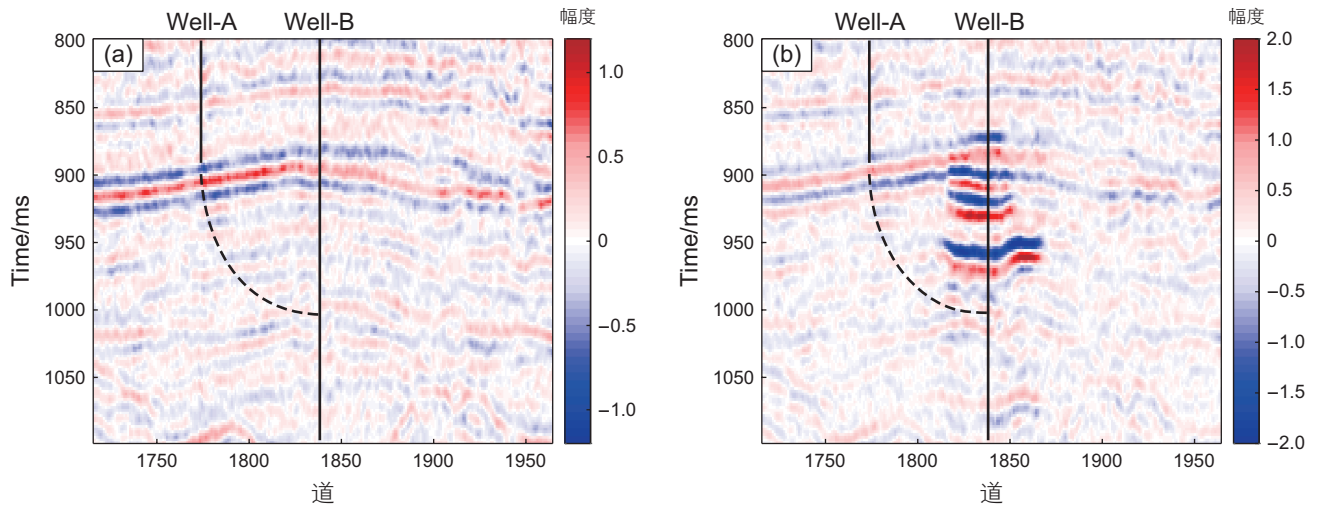


图 5 Sleipner 深部咸水层 CO₂ 地质封存叠后数据 (a) 基础数据; (b) 监测数据
 Fig. 5 Data of CO₂ geological storage in Sleipner's deep saline aquifer after stacking (a) basic data; (b) monitoring data

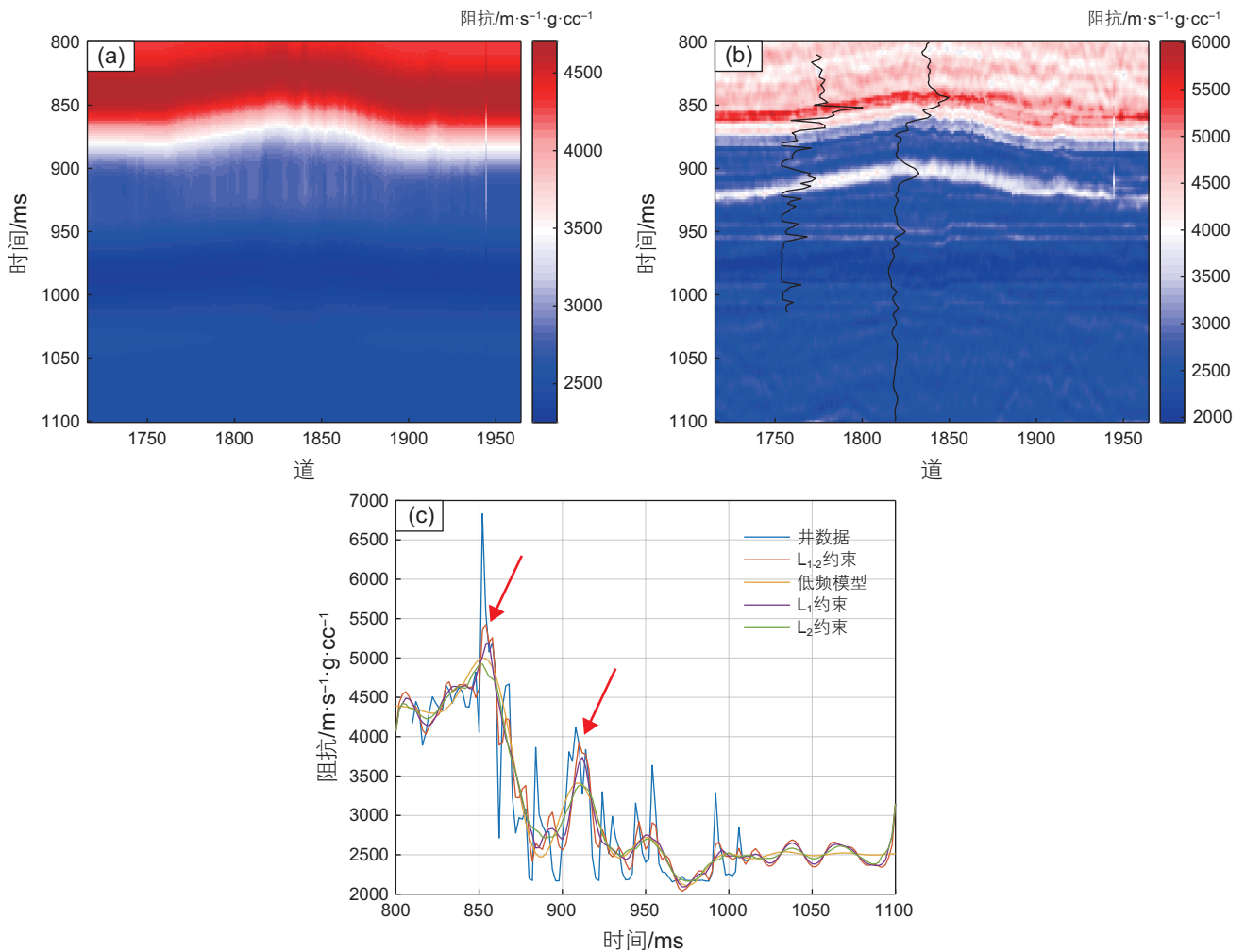


图 6 基础数据叠后阻抗反演结果 (a) 基础数据的波阻抗低频模型; (b) L_{1-2} 约束的波阻抗反演结果; (c) 井 Well-A 位置处的多种约束反演结果对比
 Fig. 6 The impedance inversion results of basic data (a) the low-frequency model of impedance corresponding to the basic data; (b) L_{1-2} constrained impedance inversion result; (c) comparison of multiple constraint inversion results at Well-A location

中可以看出, 相比于 L_1 和 L_2 范数, $L_{1,2}$ 范数约束的反演结果与Well-A中真实测井结果相似度最高, 在许多波阻抗变化界面处能够最好的刻画边界信息, 这与模型反演时的结论是一致的, 因此后续我们采用 $L_{1,2}$ 范数的结果继续进行时移波阻抗反演。由于Well-A处并未产生明显的波阻抗变化(CO_2 并未运移到此处), 因此我们在图中Well-B位置(CDP 1836)处建立了一口伪井, 伪井波阻抗值采用图6b中的反演结果, 通过时移测井曲线方法计算了该位置处的时移波阻抗曲线。

将图6b中的反演结果代入反演框架中可以计算得到差异波阻抗结果, 如图7所示, 图7a为计算的 f - x

滤波后差异波阻抗结果, 黑色曲线为时移波阻抗测井曲线(方波化处理)。超临界 CO_2 注入砂体引起砂体的速度降低, 从而导致砂体的波阻抗降低, 从图中可以看出, 差异波阻抗在纵向上具有明显的分层现象, 这是由于砂体间的泥岩夹层导致的。差异波阻抗的变化范围与叠后差异振幅的范围一致。图7b展示了时移测井波阻抗与该位置处的差异波阻抗反演结果, 二者具有较高的一致性。

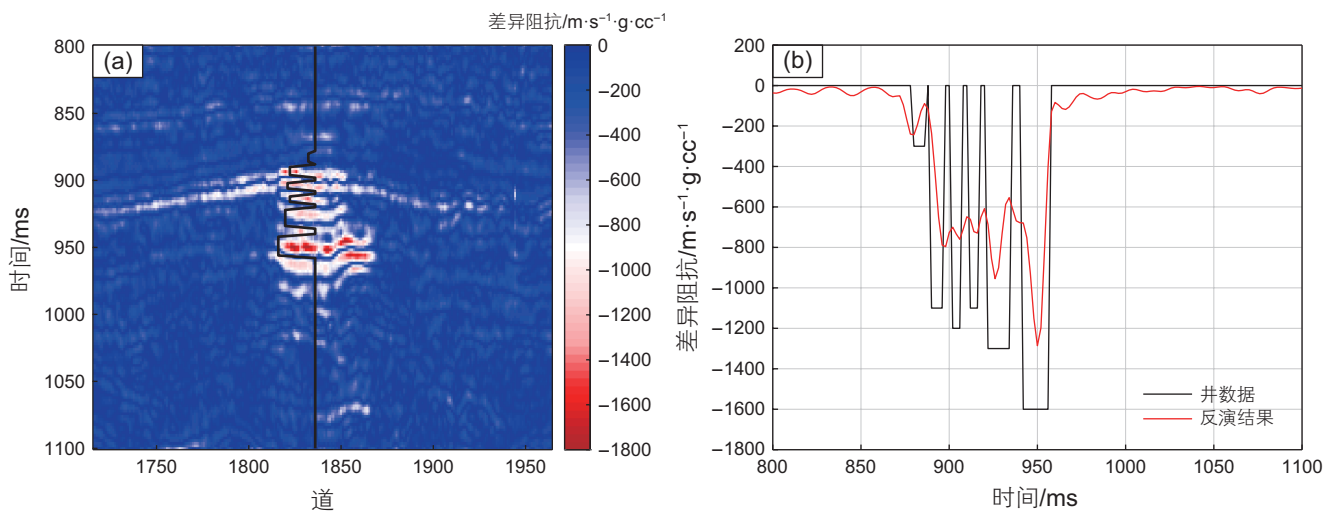


图7 实际资料差异阻抗反演结果 (a) 差异波阻抗反演结果; (b) Well-B位置处的时移测井波阻抗与差异波阻抗反演结果对比

Fig. 7 Difference impedance inversion results of real data (a) the inversion results of differential impedance; (b) the comparison between the logging impedance at Well-B position and the inversion results of differential impedance

4 结论

1) 通过模型与实际资料的应用测试, 验证了在预测差异波阻抗时, 由于 L_2 范数对反演结果的平滑效果, 导致在阻抗差异界面处并不能有效恢复真实阻抗; 相比之下, L_1 范数能够获得相对更加稀疏的反演结

果, $L_{1,2}$ 范数能够得到最高分辨率的反演结果, 并且能够最清晰的描述差异阻抗边界信息, 这与实际时移阻抗形态是吻合的。

2) f - x 滤波可以有效地改善单道反演造成的横向不连续问题, 将 $L_{1,2}$ 范数约束与 f - x 滤波结合可以更加精准地预测时移差异波阻抗。

参考文献

- [1] HUANG C, ZHU T Y, XING G C. Data assimilated time-lapse visco-acoustic full waveform inversion: Theory and application for injected CO_2 plume monitoring[J]. Geophysics, 2022, 88(1): R105-R120.
- [2] 郝艳军, 杨顶辉, 程远锋. 基于自适应杂交遗传算法的 CO_2 地质封存的储层参数反演研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(11): 4234-4245. [HAO Y J, YANG D H, CHENG Y F. Research on reservoir parameter inversion of CO_2 geological storage based on adaptive hybrid genetic algorithm[J]. Journal of Geophysics, 2016, 59(11): 4234-4245.]
- [3] 黄世军, 王鹏, 赵凤兰. 页岩油注 CO_2 重有机质沉积机理的分子模拟[J]. 石油科学通报, 2024, 9(02): 307-317. [HUANG S J, WANG P, ZHAO F L. Molecular simulation of CO_2 heavy organic matter deposition mechanism in shale oil injection[J]. Petroleum Science Bulletin, 2024, 9(02): 307-317.]

- [4] 陈小宏, 牟永光. 四维地震油藏监测技术及其应用[J]. 石油地球物理勘探, 1998, 33(06): 707–715. [CHEN X H, MOU Y G. Four-dimensional seismic reservoir monitoring technology and its application[J]. Petroleum geophysical exploration, 1998, 33(06): 707–715.]
- [5] 汤韦. 时移地震差异反演及应用研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019. [TANG W. Time-lapse seismic difference inversion and application research[D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2019.]
- [6] 魏书映, 陈小宏, 李景叶, 等. 基于散射理论与动态时间规整的时移地震波动方程差异反演[J]. 地球物理学报, 2023, 66(04): 1681–1698. [WEI S Y, CHEN X H, LI J Y, et al. Time-lapse seismic wave equation differential inversion based on scattering theory and dynamic time regularization[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66 (04): 1681–1698.]
- [7] WANG Y C, MOROZOV I. Time-lapse acoustic impedance variations during CO₂ injection in Weyburn oilfield, Canada[J]. Geophysics, 2019, 85(1): M1–M13.
- [8] GLUCK S, DESCHIZEAUX B, MIGNOT A, et al. Time-lapse impedance inversion of post-stack seismic data[C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2000: 1509–1512.
- [9] TANG W, LI J Y, ZHOU L, et al. Time-lapse impedance difference inversion of post-stack seismic data[C]. SEG International Exposition and 88th Annual Meeting, 2018: 5343–5347.
- [10] LI J Y, WANG S D, CHEN X H. Time - lapse seismic elastic impedance difference inversion and application[C]. SEG 2011 Annual Meeting, San Antonio, USA, 2011: 2492–2496.
- [11] BARAJAS C, MUR A, ADAMS, et al. Joint impedance and facies inversion of time-lapse seismic data for improving monitoring of CO₂ incidentally stored from CO₂-EOR[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021, 112.
- [12] 李景叶, 陈小宏. 时移地震波阻抗反演方法研究[J]. 勘探地球物理进展, 2003, 26(1): 41–44. [LI J Y, CHEN X H. Research on impedance inversion method of time-lapse seismic waves [J]. Progress in exploration geophysics, 2003, 26 (1): 41–44.]
- [13] DUARTE W, RIFFAULT D, DOUMA H. Efficient wave-equation-based forward modeling of time-lapse post-stack seismic images with illumination variations[C]. 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 2017: 1746–1751.
- [14] ZHU Z Y, JIANG X D, ZHAO W, et al. Time - lapse pre-stack elastic impedance inversion based on seismic difference data[C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011: 2497–2501.
- [15] 刘成芳, 魏华动, 刘瑞. 基于各向异性梯度约束的裂缝弱度贝叶斯反演方法[J]. 石油物探, 2024, 63(03): 645–653. [LIU C F, WEI H D, LIU R. Bayesian inversion method for fracture weakness based on anisotropic gradient constraints [J]. Petroleum geophysical exploration, 2024, 63(03): 645–653.]
- [16] ZHOU L, LIAO J P, LIU X Y, et al. A high-resolution inversion method for fluid factor with dynamic dry-rock V_p/V_s ratio squared[J]. Petroleum Science, 2023, 20(05): 2822–2834.
- [17] 周林, 廖建平, 李景叶, 等. 基于精确 Zoeppritz 方程的储层含油气性预测方法[J]. 地球物理学报, 2021, 64(10): 3788–3806. [ZHOU L, LIAO J P, LI J Y, et al. Prediction method for oil and gas content in reservoirs based on precise Zoeppritz equation [J]. Journal of Geophysics, 2021, 64 (10): 3788–3806.]
- [18] YING X Y, ZHANG S X. Bayesian inversion for effective pore-fluid bulk modulus based on fluid-matrix decoupled amplitude variation with offset approximation[J]. Geophysics, 2014, 79(5): R221–R232.
- [19] 彭国民, 刘展, 于会臻, 等. 基于柯西分布约束和快速近端目标函数优化的三维重力反演方法[J]. 地球物理学报, 2018, 61(12): 4934–4941. [PENG G M, LIU Z, YU H Z, et al. Three-dimensional gravity inversion method based on cauchy distribution constraints and fast proximal objective function optimization[J]. Journal of Geophysics, 2018, 61(12): 4934–4941.]
- [20] WANG L, ZHOU H, WANG Y, et al. Three-parameter pre-stack seismic inversion based on L_{1-2} minimization[J]. Geophysics, 2019, 84(5): R753–R766.
- [21] WANG Y, MA X, ZHOU H, et al. L_{1-2} minimization for exact and stable seismic attenuation compensation[J]. Geophysical Journal International, 2018, 213(3): 1629–1646.
- [22] 耿伟恒, 陈小宏, 李景叶, 等. 基于 L_{1-2} 正则化的地震波阻抗“块”反演[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(06): 1409–1417. [GENG W H, CHEN X H, LI J Y, et al. Seismic wave impedance “block” inversion based on L_{1-2} regularization [J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2022, 57 (06): 1409–1417.]
- [23] 侯斯允, 李景叶, 耿伟恒, 等. 基于微分超拉普拉斯块约束的改进弹性阻抗反演方法[J]. 石油科学通报, 2024, 9(04): 549–562. [HOU S Y, LI J Y, GENG W H, et al. Improved elastic impedance inversion method based on differential hyper Laplace block constraints [J]. Petroleum Science Bulletin, 2024, 9(04): 549–562.]
- [24] 李远强. 基于波动方程解析解的叠前反演方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021. [LI Y Q. Research on pre-stack inversion method based on analytical solutions of wave equations [D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2021.]
- [25] CANALES L. Random noise reduction[C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1984: 329–329.
- [26] SPITZ S. Seismic trace interpolation in the $f-x$ domain[J]. Geophysics, 1991, 56(6): 785–794.

- [27] 张健. 地震约束油藏表征及其不确定性定量评价方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021. [ZHANG J. Research on seismic constrained reservoir characterization and uncertainty quantitative evaluation method [D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2021.]
- [28] 王宁, 周辉, 王玲谦, 等. 数据驱动的块排列正则化多道叠前地震反演[J]. 地球物理学报, 2022, 65(7): 2681–2692. [WANG N, ZHOU H, WANG L Q, et al. Data driven block arrangement regularization for multi-channel pre-stack seismic inversion[J]. Journal of Geophysics, 2022, 65(7): 2681–2692.]
- [29] 王彦飞, 唐静, 耿伟峰, 等. 带粒子滤波约束的PP-PS联合反演的稀疏解算法[J]. 地球物理学报, 2018, 61(3): 1169–1177. [WANG Y F, TANG J, GENG W F, et al. A sparse solution algorithm for PP-PS joint inversion with particle filter constraints[J]. Journal of Geophysics, 2018, 61(3): 1169–1177.]
- [30] QIAO T, TURKIYAH G, SCHUSTER G. Travel-time tomography and efficient physics-informed Bayesian inversion[C]. Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy, 2022: 2040–2044.
- [31] PRATIKNA K, RAHMAN M, MONDOL N. Characterization of Utsira formation around the Sleipner CO₂ storage site, central North Sea[C]. Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy, 2022: 552–556.
- [32] RUSSELL B. Repeatability indicators in time-lapse seismology and their application to the Sleipner CO₂ storage project[C]. Carbon Capture, Utilization, and Storage Conference and Exhibition, 2024: 425–434.

(编辑 付娟娟)

第一作者: 李文瑾 (1997 年—), 博士研究生, 从事时移地震解释、储层预测、CO₂ 地质封存等方面研究, lwj_6016@163.com。

通信作者: 李景叶 (1978 年—), 博士, 教授, 从事时移地震解释、叠前 AVO 反演、多波联合反演、岩石物理等方面研究, lijingye@cup.edu.cn。