doi: 10.11720/wtyht.2026.1365
唐和昊, 蔺玉婴, 邢磊, 等. 基于波场重构反演(WRI)的时移地震反演方法——以二氧化碳地质封存动态监测模型数据为例[J]. 物探与化探, 2026, 50(2): 260-269. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1365
Tang H H, Lin Y Z, Xing L, et al. A time-lapse seismic inversion method based on wavefield reconstruction inversion for the dynamic monitoring model data of geologic CO_2 sequestration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(2): 260-269. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1365

基于波场重构反演(WRI)的时移地震反演方法——以二氧化碳地质封存动态监测模型数据为例

唐和昊, 蔺玉婴, 邢磊, 张进
(中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 二氧化碳地质封存监测中, 时移地震资料能够反映二氧化碳注入引起的饱和度以及相关储层物性参数的微小变化, 对评估封存安全性与有效性具有重要意义。传统全波形反演虽能利用全波形信息, 但其非线性较强, 且对初始模型和低频成分较为依赖, 易产生"跳周"现象。为解决上述问题, 本文将波场重构反演方法引入时移地震反演, 并结合并行反演和双差反演策略, 形成适用于二氧化碳地质封存监测的反演流程。模型测试结果表明, 基于并行策略的波场重构反演方法能够有效抑制假象并恢复速度变化区域的几何形态, 双差反演策略进一步增强了反演的稳定性。其中基于双差策略的波场重构反演方法在强弱异常区均能准确反映速度扰动, 假象显著减少, 边界清晰度与幅值恢复效果优于传统方法。该方法不仅提高了目标区域的反演精度, 而且增强了储层变化的可识别性, 为二氧化碳地质封存的四维地震监测提供了一种稳健、可靠的技术手段。

关键词: 二氧化碳地质封存; 时移地震; 全波形反演; 波场重构反演
中图分类号: P631.4; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)02-0260-10

0 引言

随着全球温室效应的不断加剧, 全球气候变暖成为了人类急需解决的重要环境问题。碳捕集、利用与封存(carbon capture utilization and storage, CCUS)技术成为实现碳中和目标的核心手段之一[1-3]。其中, 地质封存通过将二氧化碳(CO_2)注入地下深部储层(如咸水层、枯竭油气藏等), 可以实现长期封存, 从而有效减少人为碳排放向大气中的释放, 对缓解全球气候变暖并支撑碳中和目标的实现具有重要意义。但地质封存的规模化应用需解决封存安全性、有效性及环境风险等关键问题。为了确保 CO_2 地质封存的安全性, 我们必须对注入地下的 CO_2 进行不同阶段的监测[4]。目前已提出多种 CO_2 地质封存监测技术体系, 包括地球物理监测、地球化学监测、遥感监测以及示踪剂监测等。其中, 地球物理监测技术由于其非侵入性和对地下物性变化的高敏感性, 能够在不干扰储层条件的情况下实现多尺度成像, 在 CO_2 封存过程的时移监测中具有不可替代的优势, 四维(时移)地震监测因此成为 CO_2 地质封存中应用最为广泛的地球物理监测手段之一[5]。

地震监测技术是当前最有效的 CO_2 地质封存动态监测手段之一。与传统油气勘探地震相比, CO_2 封存监测更强调反演分辨率, 以捕捉封存过程中储层参数的微小变化[6]。由于地震波速对流体性质高度敏感, 尤其是 CO_2 的高可压缩性对纵波速度 V_p 影响显著, 当 CO_2 置换盐水时, 即使在中等饱和度条件下也会导致 V_p 明显降低[7-9]。因此, 地震监测能够有效反映 CO_2 注入引起的地下物性变化, 为早期泄漏预警和储层稳定性评价提供可靠信息[10]。

时移地震监测(四维地震监测)是 CO_2 地质封存

收稿日期: 2025-10-15; **修回日期:** 2026-01-20
基金项目: 山东省青年科技人才托举工程(SDAST2025QTB066); 深地国家科技重大专项(2024ZD1004301); 国家自然科学青年科学基金 C 类项目(42406066)
第一作者: 唐和昊(1999-), 男, 目前硕士研究生就读于中国海洋大学, 主要从事二氧化碳地质封存动态监测、时移地震、波场重构反演相关的工作。Email: tanghehao1999@stu.ouc.edu.cn

研究中的核心技术,其原理是在同一区域多次采集三维地震数据,以时间作为第四维度进行对比[11-14]。通过比较注入前、注入过程中以及不同阶段的数据差异,可有效追踪 CO_2 在储层中的分布与迁移范围,从而评价封存过程的安全性[15]。然而,CO_2 注入所引起的储层物性变化往往幅度有限,需要借助高精度的反演方法才能可靠刻画[16]。在现有的时移地震反演方法中,主要包括 3 类思路:①并行反演,即分别对基准数据和监测数据独立反演,再对结果取差以获取储层变化信息;②连续反演,即将基准数据反演结果作为监测数据的初始模型,进一步更新以获得动态变化;③差异数据反演,即对不同阶段数据进行匹配处理后,直接对其差异体实施反演,从而得到时移参数[17-19]。

全波形反演 (full waveform inversion, FWI)[20-21] 利用全波形信息,对地震炮记录与模型正演炮记录的差值建立目标泛函,利用局部优化思想计算梯度方向,通过不断迭代更新地下介质参数使两者残差越来越小,从而实现优化介质参数的目的。全波形反演不仅考虑了地震波传播的走时等运动学信息,而且加入了振幅、相位等动力学信息,能够适应强横向变速介质和各向异性介质的速度反演。它是目前精度最高的一种速度反演方法,通过迭代反演得到高精度的地下构造,能够满足目前勘探开发日益复杂的需求[22]。因此,FWI 在 CO_2 地质封存监测中具有良好的应用潜力,尤其适用于刻画 CO_2 注入引起的细尺度速度变化和储层结构的精细成像。但全波形反演是一个强非线性反演问题,难以进行准确求解,更由于实际资料的复杂性,难以进行实际应用。

Van Leeuwen 等 [23] 为解决全波形反演在计算效率和局部极值方面的限制,提出了波场重构反演 (wavefield reconstruction inversion, WRI)。该方法在目标函数中引入波动方程惩罚项,并将波场与模型参数同时作为反演变量进行联合优化。通过扩展搜索空间,反演结果更加稳定,受局部极小值的影响也相对较小。在这一框架下,惩罚因子起到了关键作用,它通过平衡波形匹配项与波动方程约束项来决定反演精度与稳定性。随后,Van Leeuwen 等 [24] 进一步完善了 WRI 理论,揭示了重构波场的物理意义,并对惩罚因子的取值范围进行了经验性探讨;Fang 等 [25] 则基于 Bayesian 理论,对 WRI 的不确定性进行了定量研究。Van Leeuwen 等 [26] 提出了惩罚因子的选择策略:先通过调节使两部分项处于同一数量级以确定初始值,再在反演过程中逐步增加。该方法与 da Silva [27] 提出的基于积性函数的策略类似,但在精度和稳定性方面仍存在不足。此后,蔺玉婴等 [28] 设计了一种新的惩罚因子算法以实现 WRI 的自动化;Li 等 [29] 与 Rizzuti 等 [30] 则将 WRI 拓展至时间域。进一步地,Lin 等 [31] 提出了一种将 WRI 形式转化为 FWI 的算法,通过引入数据域 Hessian 矩阵与加权残差,实现了对“跳周”(cycle-skipping)现象和非物理数据的有效抑制,并验证了该方法在二维和三维大规模模型中的适用性。总体而言,WRI 兼具正演算子鲁棒性、较弱的非线性特征以及对“跳周”现象的较强抵抗力。

本文将 WRI 引入时移地震反演,以解决传统 CO_2 地质封存时移地震监测中 FWI 的强非线性问题,以期利用 WRI 的优势,提高时移地震反演结果的稳定性和准确性。

1 理论

1.1 反演方法

1.1.1 全波形反演理论

全波形反演利用全波形信息,对地震炮记录与模型正演炮记录的差值建立目标泛函,利用局部优化思想计算梯度方向,通过不断迭代更新地下介质参数使两者残差越来越小,从而实现优化介质参数的目的,构建反演目标函数的方法有很多,其中最小二乘目标函数是比较经典也是比较常用的一种,本文所涉及到的全波形反演都是建立的最小二乘目标函数,通常目标函数通过对残差取最小平方和(L_2 范数)得到[32]:

$$E(\boldsymbol{m}) = \frac{1}{2}\|\boldsymbol{d}-\boldsymbol{P}\boldsymbol{u}\|^2, \tag{1}$$

式中: $E(\boldsymbol{m})$ 表示以模型参数为 $\boldsymbol{m}$ 变量的目标函数值; $\boldsymbol{d}$ 为观测得到的实际数据; $\boldsymbol{P}$ 代表采样算子; 通过模型参数 $\boldsymbol{m}$ 正演得到的模拟波场 $\boldsymbol{u} = \boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})^{-1}\boldsymbol{q}$, 其中 $\boldsymbol{A}$ 为正演算子, $\boldsymbol{q}$ 为源项。

建立目标函数的目的是为了求解反问题得到最优的模型参数 $\boldsymbol{m}$, 目标函数关于模型参数的导数即为梯度[32]:

$$\boldsymbol{g} = \frac{\partial E(\boldsymbol{m})}{\partial \boldsymbol{m}} = \left(\frac{\partial \boldsymbol{P}\boldsymbol{u}}{\partial \boldsymbol{m}}\right)^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{d}-\boldsymbol{P}\boldsymbol{u}], \tag{2}$$

定义伴随波场[33]:

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v} = \boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{d}-\boldsymbol{P}\boldsymbol{u}_0), \tag{3}$$

式中: T表示矩阵的转置。将伴随波场 $\boldsymbol{v}$ 代入式 (2) 化简可以得到:

$$\boldsymbol{g} = \left(\frac{\partial \boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})}{\partial \boldsymbol{m}}\boldsymbol{u}_0\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}。 \tag{4}$$

可以看出梯度 $\boldsymbol{g}$ 为背景波场与伴随波场的零延迟互相关，负梯度的方向代表数据残差减小最快的方向。基于梯度可以得到 FWI 的迭代公式[32]：

$$\boldsymbol{m}^{(k+1)} = \boldsymbol{m}^{(k)} - \alpha \boldsymbol{g}^{(k)}, \tag{5}$$

式中：k 表示反演的迭代次数；$\boldsymbol{m}$ 表示需要更新的模型参数；α 在不同的梯度求解过程中有不同的含义，在梯度类算法时 α 为常数，作为迭代的步长，在牛顿类算法时，α 为海森矩阵的逆。显然，目标函数中的数据残差要求模拟数据和观测数据的走时接近，如果两者的误差大于 1/2 周期，即会产生“跳周”现象，导致反演结果不准确。

1.1.2 波场重构反演理论

基于之前的研究，van Leeuwen 等[23] 针对计算效率和局部极值问题，提出了波场重构反演 (WRI)。WRI 是一种新的基于惩罚方法的地震波动方程反演，通过将地震波动方程作为惩罚项加入到 FWI 的目标函数中，将波场和模型参数都作为反演的参数进行计算，拓展了解的寻优空间，有效减弱了反演的非线性。在实际地震勘探中，往往缺少低频数据，由于 FWI 对于低频数据的敏感性，当初始模型不够准确且输入的地震数据缺少低频信息时会导致反演陷入局部极小值，从而无法收敛。WRI 扩大了搜索空间，可以同时从模型空间和数据空间寻找目标函数的最优解，减少了对低频信息的依赖。 WRI 的目标函数可以表示为[31]：

$$\mathcal{J}(\boldsymbol{m},\boldsymbol{u}) = \|\boldsymbol{P}\boldsymbol{u}-\boldsymbol{d}\|^2 + \lambda\|\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})\boldsymbol{u}-\boldsymbol{q}\|^2, \tag{6}$$

式中：第一项为传统全波形反演中模拟数据和观测数据的残差项；第二项为惩罚项，即波动方程 $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})\boldsymbol{u} = \boldsymbol{q}$ 的差项，$\lambda > 0$ 为惩罚因子[31]。

可以利用交替优化算法[34] 对上述目标函数进行求解：首先固定模型参数 $\boldsymbol{m}$，令目标函数对波场 $\boldsymbol{u}$ 的导数为 0，得到：

$$\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{P}\boldsymbol{u}-\boldsymbol{d}) + \lambda\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A}\boldsymbol{u}-\boldsymbol{q}) = 0, \tag{7}$$

通过进一步化简我们可以得到增广波动方程：

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})\bar{\boldsymbol{u}} = \boldsymbol{q} + \frac{1}{\lambda}\left[\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})^{-1}\right](\boldsymbol{d}-\boldsymbol{P}\bar{\boldsymbol{u}}), \tag{8}$$

式中：$\bar{\boldsymbol{u}}$ 即为重构后波场。可以看到，公式左右两边都存在波场 $\bar{\boldsymbol{u}}$，大大增加了求解的难度。但是因为反演的求解过程并不是单一的，而是不断迭代的。因此，我们可以将左侧的波场看作需要求解的重构波场 $\bar{\boldsymbol{u}}$，右侧的波场为确定的背景波场 $\boldsymbol{u_0}$，在实际求解过程中，背景波场是通过正演模拟提前给定的，因此可以顺利求解[31]。

之后可以固定波场 $\bar{\boldsymbol{u}}$ 的值，再次令目标函数对模型参数的导数为 0，可以得到模型参数的更新梯度：

$$\boldsymbol{g}_m = 2\lambda\left(\frac{\partial \boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})\bar{\boldsymbol{u}}}{\partial \boldsymbol{m}}\right)^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})\bar{\boldsymbol{u}}-\boldsymbol{q}]。 \tag{9}$$

反演最初的想法是通过目标函数拟合地震数据差异来得到模型差异。但是由于初始模型的不准确和地震数据的不稳定（如在实际采集过程中缺少低频信息等），会导致反演结果受到假象和“跳周”现象影响。但通过定义伴随源 $\boldsymbol{s}=\left[\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})^{-1}\right]^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{d}-\boldsymbol{P}\boldsymbol{u})$ 从而将上述梯度分解为[28,35]：

$$\boldsymbol{g}_m^1 = 2\left(\frac{\partial \boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})\boldsymbol{u_0}}{\partial \boldsymbol{m}}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}, \tag{10}$$

$$\boldsymbol{g}_m^2 = 2\left(\frac{\partial \boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})\boldsymbol{u}_s}{\partial \boldsymbol{m}}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}, \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})\boldsymbol{u}_s = \frac{1}{\lambda}\left[\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})^{-1}\right]^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{d}-\boldsymbol{P}\boldsymbol{u})$。第一项梯度 $\boldsymbol{g}_m^1$ 与传统的 FWI 梯度相似。第二项梯度 $\boldsymbol{g}_m^2$ 本质上是伴随震源与其激发的波场的零延迟互相关，表现从接收器到反射点的波路径，可以在反演过程中提供低波数的更新，保证反演的稳定性和准确性，减弱周波跳跃现象[28,35]。

1.2 时移地震反演策略

1.2.1 并行反演

并行反演 (parallel inversion, PRI) 是最简单的时移地震反演策略，其主要内容是对两个不同的地震数据分别进行独立的地震反演，然后使用监测数据的反演结果和基准数据的反演结果做差，得到地下目标地层的物性参数变化，如图 1a 所示。这类反演策略的优势在于，因为其本质类似于两次独立的反演，因此对监测数据和基准数据的数据一致性要求不高，对不同时间数据采集的采集参数，如观测系统、子波等没有严格的要求。但是，因为是两次相对独立的反演，反演过程中难免会引入较多时移误差，并不能较好地反映目标层的物性参数变化。

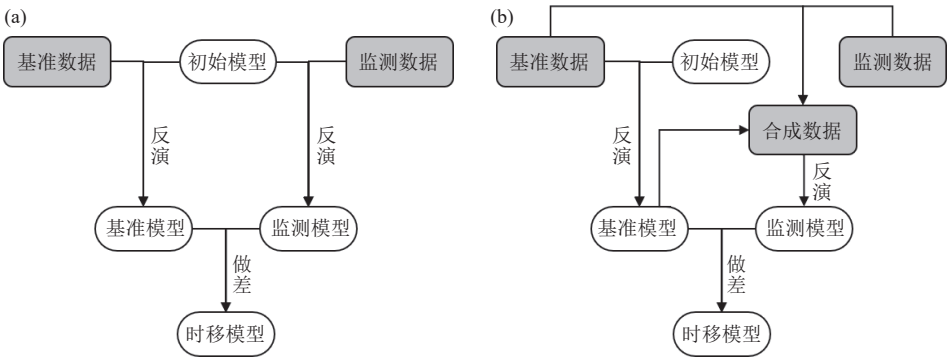
一般的，并行反演的反演流程可以写为：

$$\begin{aligned} \boldsymbol{m}_{\mathrm{base}} &= \boldsymbol{m}^0 + \sum_{i=0}^{N}\delta\boldsymbol{m}_i, \\ \boldsymbol{m}_{\mathrm{monitor}} &= \boldsymbol{m}^0 + \sum_{i=0}^{N}\delta\boldsymbol{m}_i, \end{aligned} \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{m}^0$ 为初始模型；i 为反演的迭代次数；$\delta\boldsymbol{m}_i$ 为每次迭代计算的模型参数的改变量，可以得到时移模型：

$$\Delta\boldsymbol{m} = \boldsymbol{m}_{\mathrm{monitor}} - \boldsymbol{m}_{\mathrm{base}}。 \tag{13}$$

并行反演包括两次独立的反演过程，如式 (12) 所示，以基准数据、一个初始模型作为输入的基准反演和以监测数据、与基准反演相同的初始模型作为输入的监测反演。因此得到的时移模型是基准



a—并行反演策略; b—双差反演策略

a—parallel inversion strategy; b—double-difference inversion strategy

图 1　时移地震反演策略流程

Fig. 1　Workflow of time-lapse seismic inversion strategies

反演结果和监测反演结果的差值, 因为传统时移反演通常使用 FWI 进行, 而 FWI 是高度非线性的, 因此两次反演之间往往存在着不同的收敛特性, 因此相减过程往往会存在大量假象[15]。并行反演策略的有效性在一定程度上依赖于基准数据与监测数据之间的重复性。当两期地震数据在采集几何、震源子波及噪声水平等方面具有较好一致性, 且初始模型能够较为准确地描述地下背景结构时, 并行反演能够分别恢复不同阶段的介质参数分布, 其反演结果具有清晰的物理意义。然而, 由于基准与监测反演过程相互独立, 当数据存在系统性差异或初始模型偏差较大时, 两次反演可能收敛至不同的局部极小值, 从而在差分结果中引入伪时移响应。因此, 并行反演更适用于数据可重复性较高、时移效应相对明显的监测场景。

1.2.2　双差反演

为了进一步提高反演准确性, 付欣等[15] 提出了双差波形反演 (double difference inversion, DDI) 的思想, 即对两个数据集进行联合反演。因此, 与并行反演可能导致两期数据各自收敛于不同局部极小值相比, 双差反演通过将基准反演结果作为监测阶段的初始模型并实施联合约束, 有效增强了整体收敛性, 从而提升了时移反演结果的稳定性与可靠性。双差反演的工作流程如图 1b 所示, 同样含有两个反演步骤。首先对于基准反演, 其反演流程和前两种反演过程相同。DDI 监测反演的初始模型是基准数据反演的最终结果, 同时包含两个数据集, 目标函数修改为[17]:

$$E_{\mathrm{DD}}(\boldsymbol{m}_{\mathrm{monitor}}) = \frac{1}{2}\|(\boldsymbol{d}_{\mathrm{monitor}} - \boldsymbol{d}_{\mathrm{base}}) - [\boldsymbol{P}\boldsymbol{u}_{\mathrm{monitor}}(\boldsymbol{m}) - \boldsymbol{P}\boldsymbol{u}_{\mathrm{base}}(\boldsymbol{m}_0)]\|^2。 \quad (14)$$

通常来说, 一次完整的 DDI 至少需要 2 个地震数据, 即基准数据 $\boldsymbol{d}_{\mathrm{base}}$ 和监测数据 $\boldsymbol{d}_{\mathrm{monitor}}$; 2 个波场, 监测波场 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{monitor}}$ 为每次从迭代得到的模型 $\boldsymbol{m} = \boldsymbol{m}_0 + \delta\boldsymbol{m}$ 中计算得到的合成波场, 基准波场 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{base}}$ 是由反演初始模型 $\boldsymbol{m}_0$ 计算得到的合成波场, 因为初始模型 $\boldsymbol{m}_0$ 在反演过程中没有进行更新, 所以 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{base}}$ 在整个反演过程中也不会发生变化。双差反演中的“双差”指的是式 (14) 中的两个差项: 第一个差项代表监测数据和基准数据之间的差异, 第二个差项代表不断更新的监测波场和初始基准波场之间的差异。与上面的方法类似, DDI 首先利用基准数据 $\boldsymbol{d}_{\mathrm{base}}$ 对基准模型 $\boldsymbol{m}_0$ 进行反演。使用 $\boldsymbol{m}_0$ 计算得到的合成波场记为 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{base}}$, 然后在基准波场中加入传统的时移反演的差异项 $(\boldsymbol{d}_{\mathrm{monitor}} - \boldsymbol{d}_{\mathrm{base}})$。在监测反演中其初始模型的选择和连续反演相同, 选择基准反演结果作为初始模型, 但是输入的监测数据并不是观测得到的监测数据, 而是一个合成的数据集, 因此我们可以优化式 (12) 为:

$$\boldsymbol{d}_{\mathrm{DD}} = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{m}_{\mathrm{base}}) + (\boldsymbol{d}_{\mathrm{monitor}} - \boldsymbol{d}_{\mathrm{base}}), \quad (15)$$

式中: $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{m}_{\mathrm{base}})$ 为基准反演结果 $\boldsymbol{m}_{\mathrm{base}}$ 正演得到的合成波场; $(\boldsymbol{d}_{\mathrm{monitor}} - \boldsymbol{d}_{\mathrm{base}})$ 是数据差异, 即实际监测数据减去实际基准数据。因此相对于 FWI 我们可以更新目标函数为:

$$E_{\mathrm{DD}}(\boldsymbol{m}_{\mathrm{monitor}}) = \frac{1}{2}\|\boldsymbol{d}_{\mathrm{DD}} - \boldsymbol{F}(\boldsymbol{m}_{\mathrm{monitor}})\|^2, \quad (16)$$

式中: $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{m}_{\mathrm{monitor}})$ 是由监测模型预测的合成波场。和上面的反演策略相比, DDI 唯一额外的步骤就是合成数据的构建, 大大减小了整个反演过程的计算量。同时, DDI 直接基于不同数据集之间的差异进行反演, 可以避免常规反演流程中落入不同局部极小值的问题, 进一步提升反演结果的稳定性。DDI 可以减少监测和基准反演之间的收敛差异, 可以更有效地抑制时移差异区域之外的假象。

值得注意的是, DDI 直接基于不同数据集之间

的差异进行反演，是一种以目标差异为导向的反演策略，因此其反演过程非常依赖式 (13) 中的时移数据差异项。在时移地震数据采集过程中，这些差异项相较于整个地震数据而言较小，所以基准和监测数据的一致性显得十分重要。但是在时移地震数据采集过程中容易受到不可重复性的影响，这些影响在反演中会造成严重的假象。在计算效率方面，PRI需要进行两次独立的反演流程，尤其是监测反演过程中，依然需要使用初始模型开始进行反演。而DDI 通过使用合成数据 $\boldsymbol{d}_{\mathrm{DD}}$ 作为反演的输入，基准反演结果作为监测反演的初始模型输入时，其反演过程仅需要拟合时移误差极大程度上减小反演所需计算量，从而提高反演的收敛速度。

不同时移地震反演策略的目的是为了获得准确的模型时移变化：

$$\Delta \boldsymbol{m} = \boldsymbol{m}_{\mathrm{monitor}} - \boldsymbol{m}_{\mathrm{base}}, \tag{17}$$

由式 (17) 可得，模型时移变化是由得到的监测模型 $\boldsymbol{m}_{\mathrm{monitor}}$ 减去基准模型 $\boldsymbol{m}_{\mathrm{base}}$ 得到的。其中，监测模型 $\boldsymbol{m}_{\mathrm{monitor}}$ 是通过监测数据进行反演得到的结果，基准模型 $\boldsymbol{m}_{\mathrm{base}}$ 是通过基准数据进行反演得到的结果。值得注意的是，无论是监测模型还是基准模型，都存在两类误差。一种是采集地震数据过程中，由于观测系统的不可重复性导致的偶然误差；另一种是在反演过程中无法避免的反演误差。而提出不同的时移地震反演策略，就是为了尽可能减少这两类误差的影响。

为了进一步讨论两类误差，我们使用 $N_{\mathrm{bas}}^{\mathrm{acq}}$ 表示基准模型的采集误差，$N_{\mathrm{mon}}^{\mathrm{inv}}$ 表示监测模型的反演误差。在双差反演中，可以得到：

$$\boldsymbol{m}_b = \boldsymbol{m}_b[N_{\mathrm{bas}}^{\mathrm{acq}}, N_{\mathrm{bas}}^{\mathrm{inv}}(\boldsymbol{m}_0)], \tag{18}$$

$$\boldsymbol{m}_m = \boldsymbol{m}_m[N_{\mathrm{mon}}^{\mathrm{acq}}, N_{\mathrm{mon}}^{\mathrm{inv}}(\boldsymbol{m}_{\mathrm{syn}})]。 \tag{19}$$

通过上述式子我们可以分析得出，$\Delta \boldsymbol{m}$ 存在两部分误差：

$$c_1 = N_{\mathrm{bas}}^{\mathrm{acq}} + N_{\mathrm{mon}}^{\mathrm{acq}}, \tag{20}$$

$$c_2 = N_{\mathrm{bas}}^{\mathrm{inv}} + N_{\mathrm{mon}}^{\mathrm{inv}}。 \tag{21}$$

针对 c_2 误差项，DDI 使用合成数据 $\boldsymbol{d}_{\mathrm{DD}}$ 作为反演的输入，而不是监测数据本身，是因为在使用真实模型作为反演的初始模型时，其反演结果应该完全收敛到真实模型。因此，使用合成数据作为反演的输入，基准反演结果作为监测反演的初始模型时，其反演结果也应该完全收敛到基准反演结果。这时反演重点是以时移误差的散射体进行成像，也就是观测模型之间的物性变化，即：

$$N_{\mathrm{mon}}^{\mathrm{inv}} \approx 0。 \tag{22}$$

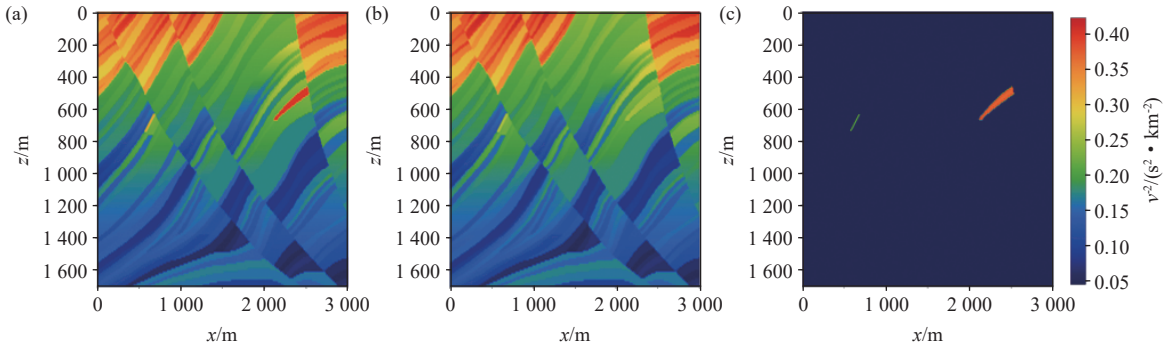
由此可以得出结论，DDI 是针对模型数据变化进行反演，可以提供更为精确的模型变化结果。相较于并行反演，双差反演策略通过直接对基准与监测数据的差分进行反演，在数据层面抑制了与时间无关的背景误差，使反演更加聚焦于介质参数的变化本身。因此，该策略在时移效应较弱、目标变化幅度较小或初始模型不够精确的情况下，通常具有更好的稳定性和一致性。但需要注意的是，双差反演对采集几何的非重复性较为敏感，当震源或接收位置存在明显偏移时，差分数据中可能引入额外误差，进而影响反演结果的可靠性。因此，双差反演适用于采集条件高度一致、且以刻画时移变化量为主要目标的监测场景。

2 模型测试

本文使用 Marmousi 模型进行模拟研究，检验 WRI 反演方法以及双差反演策略的正确性及鲁棒性。图 2 为真实模型，模型大小为 341×601，横纵网格间隔皆为 5 m；地表放炮，接收点位置在地下 5 m 处，共 41 炮均匀分布在网格点处，炮间距 75 m；震源子波主频为 10 Hz 的雷克子波，采样间隔为 4 ms，总采样时间为 2.5 s；其中图 2a 为截取原始的真实 Marmousi 模型在本节中作为时移反演的真实基准模型。与图 2a 的基准模型相比，图 2b 在目标层对应的局部小构造位置对速度参数进行了有针对性的调整，以模拟 CO_2 注入过程中流体替换效应对储层纵波速度的影响。已有现场监测研究为该速度调整提供了定量依据：Daley 等在 Frio 盐水层 CO_2 注入试验中，基于交井地震与 VSP 时移监测资料，通过层析成像观测到目标储层内 P 波速度降低幅度可达约 500 m/s，并结合岩石物理模型分析，将该速度变化解释为约 10%~20% 的 CO_2 饱和度变化[36-38]。基于上述现场观测与岩石物理分析结果，本文在 Marmousi 模型目标层的局部区域内引入具有代表性的纵波速度扰动，其幅度控制在与实际 CO_2 注入监测中报道的速度变化量级一致的范围内。注意该设置旨在构建物理上合理的时移速度变化场景，用以验证所提出时移地震反演方法对注入前后储层速度变化的响应能力，而非对具体 CO_2 注入工况进行定量复现。具体而言，在目标层范围内适当降低了速度值，从而反映储层孔隙中原有流体被低速流体取代的物理过程。这样的设定不仅保证了监测模型与基准模型之间差异的合理性，也更贴合实际地下 CO_2 驱替过程中的动力学特征。由此得到的时移差异结果

(图 2c)能够清晰刻画注入作用引起的速度扰动区域, 为后续反演方法的准确性与鲁棒性验证提供了参考标准。

图 3 所示地震记录清晰体现了注入前后地震响应的时移特征。从基准与监测地震记录的对比可以看出, 在目标层对应的反射界面处, 监测数据的反射同相轴整体向后移动。这一变化反映出模拟由于 CO_2 注入导致储层速度降低, 地震波在该区域传播时间增加, 是典型的时移响应之一。进一步对两期数据进行差分得到的时移地震数据剖面直观揭示了这种差异在时域和空间上的集中分布。地震信号的时移区别主要集中在目标层及其上下接触带位置, 形态上与储层速度扰动区域高度吻合, 表明这些残差能量主要源自模拟 CO_2 注入引起的介质速度变化。尤其在第 21 炮的记录中, 地震同相轴的能量异常更加突出, 反映了注入区时移效应的局部增强特征。为后续 WRI 时移反演提供了清晰的数据依据和物理支撑。图 4 所示为通过高斯滤波平滑处理获得的初始模型; 该模型在所有数值试验中均保持相同的基本参数设置。

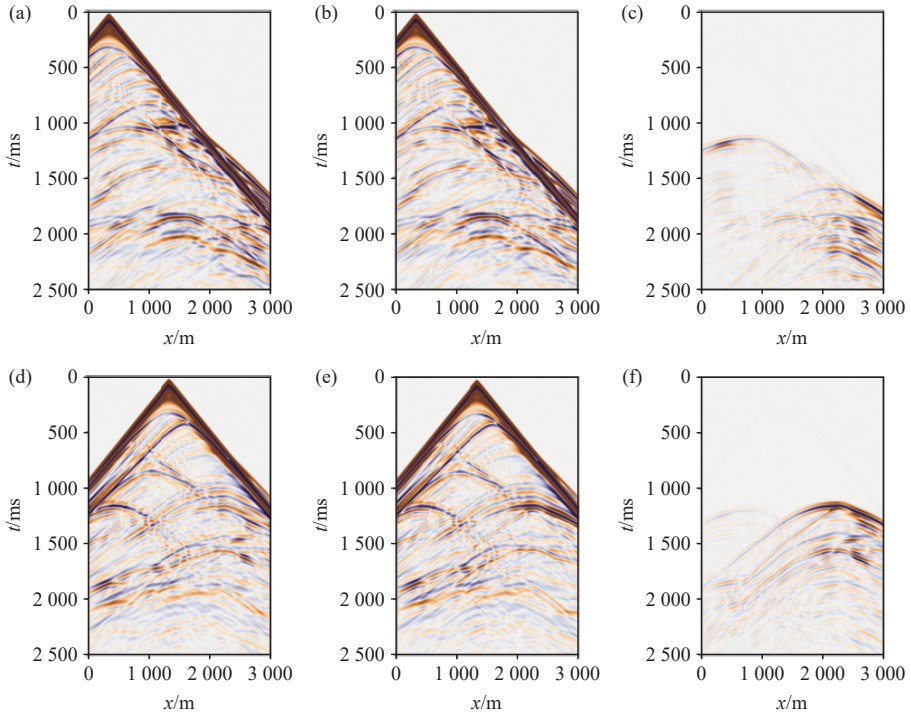


a—基准模型; b—监测模型; c—真实时移变化

a—baseline model; b—monitor model; c—true TL-misfit

图 2　真实模型

Fig. 2　True model

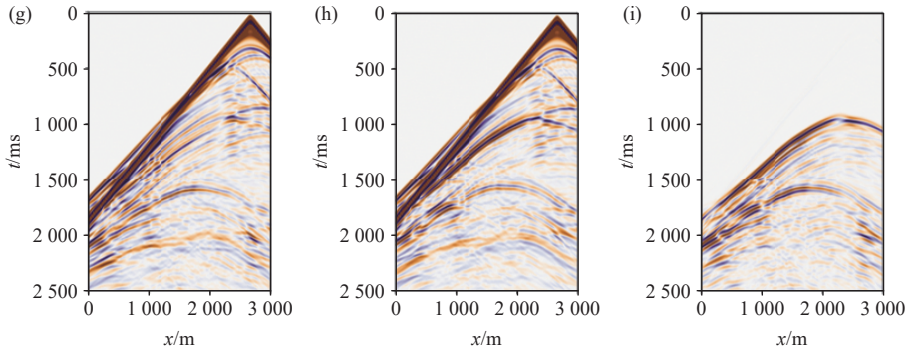


a—第 5 炮基准地震数据; b—第 5 炮监测地震数据; c—第 5 炮时移地震数据; d—第 21 炮基准地震数据; e—第 21 炮监测地震数据; f—第 21 炮时移地震数据

a—baseline data of shot 5; b—monitor data of shot 5; c—time-lapse data of shot 5; d—baseline data of shot 21; e—monitor data of shot 21; f—time-lapse data of shot 21

图 3-1　模拟注入前后不同炮地震记录

Fig. 3-1　Seismic data of different shot before and after simulated injection



g—第 38 炮基准地震数据; h—第 38 炮监测地震数据; i—第 38 炮时移地震数据

g—baseline data of shot 38; h—monitor data of shot 38; i—time-lapse data of shot 38

图 3-2　模拟注入前后不同炮地震记录

Fig. 3-2　Seismic data of different shot before and after simulated injection

以图 4 数据为基础, 首先分别进行基于并行反演策略的时移地震 FWI 方法反演(PRI-FWI)和 WRI 方法反演(PRI-WRI), 迭代 10 次的时移结果如图 5、6 所示。由图 5 可以看出, PRI-FWI 时移反演结果(图 5b)存在大量假象, 干扰较强, 尤其是在右侧目标区域出现了条带状与拖影现象, 导致异常体边界模糊, 幅值偏弱, 由于传统 FWI 反演对高频响应不足, 导致左侧细小异常体几乎难以识别。这表明, 当初始模型对浅层结构刻画不足, 且低频信息缺失时,

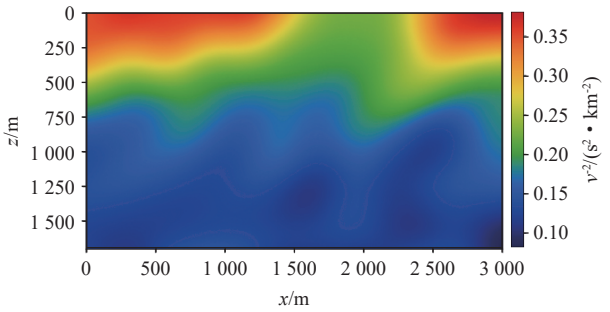
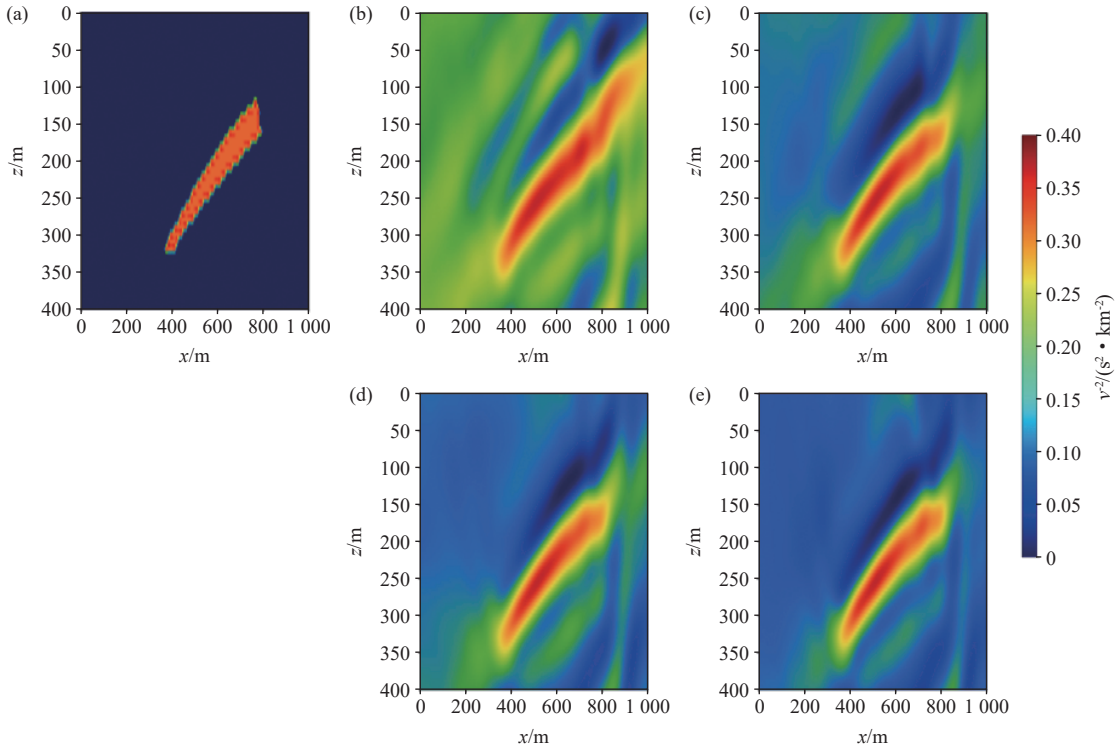


图 4　初始模型

Fig. 4　Initial model

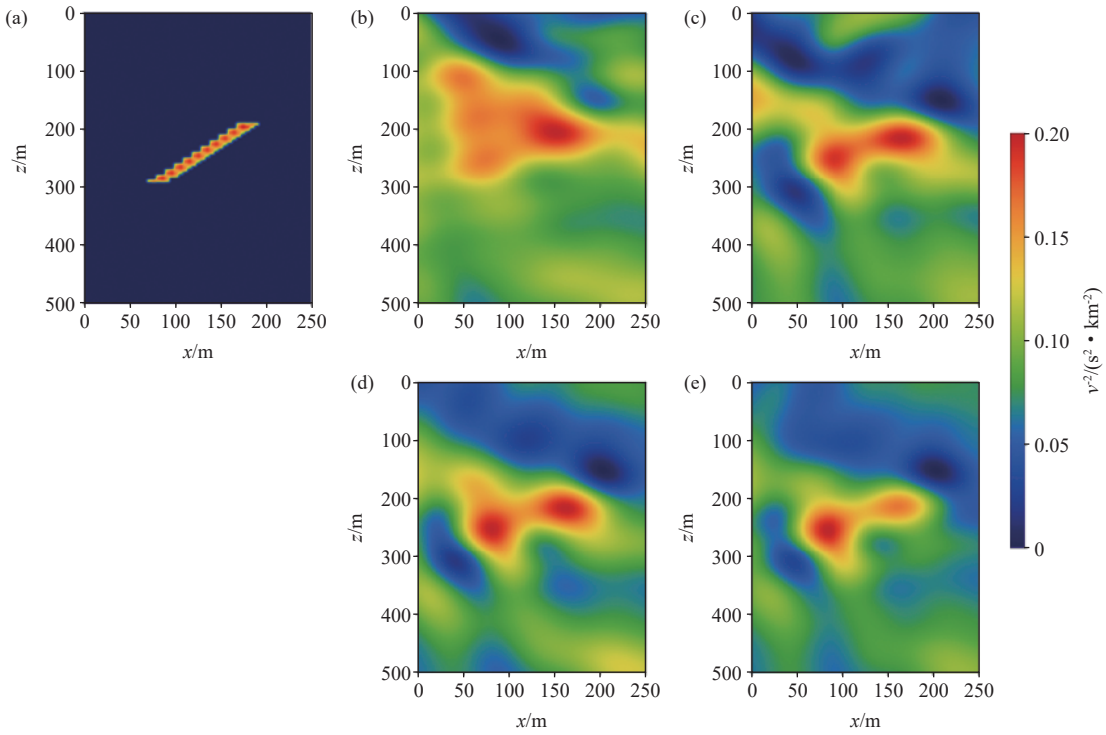


a—真实时移变化; b—PRI-FWI 时移反演结果; c—PRI-WRI 时移反演结果; d—DDI-FWI 时移反演结果; e—DDI-WRI 时移反演结果

a—true time-lapse variation; b—PRI-FWI time-lapse inversion result; c—PRI-WRI time-lapse inversion result; d—DDI-FWI time-lapse inversion result; e—DDI-WRI time-lapse inversion result

图 5　反演结果右侧区域对比

Fig. 5　Comparison of the right-hand region in inversion results



a—真实时移变化; b—PRI-FWI 时移反演结果; c—PRI-WRI 时移反演结果; d—DDI-FWI 时移反演结果; e—DDI-WRI 时移反演结果

a—true time-lapse variation; b—PRI-FWI time-lapse inversion result; c—PRI-WRI time-lapse inversion result; d—DDI-FWI time-lapse inversion result; e—DDI-WRI time-lapes inversion result

图 6　反演结果左侧区域对比

Fig. 6　Comparison of left-side regions in inversion results

传统 FWI 极易受到“跳周”现象和初始模型误差的影响, 从而在早期迭代阶段产生非物理构造成分, 导致反演结果不准确。相较之下, PRI-WRI 时移反演结果(图 5c)的结果更加准确, 能够有效抑制假象, 恢复主要时移异常的几何形态和位置: 右侧倾斜异常体的边界与真值基本吻合, 仅在顶部出现轻微低估; 左侧小尺度异常也得到了一定反映。

进一步的, 进行基于双差反演策略的时移地震 FWI 方法反演(DDI-FWI)和 WRI 方法反演(DDI-WRI), 同样迭代次数的结果如图 5d、图 5e 所示。可以看到, 与直接并行反演策略相比, 双差策略有效削弱了背景噪声和非相关干扰, 使得异常体的成像效果更加突出。图 5e 的 DDI-WRI 结果在右侧目标区域重建较为准确, 异常体形态与真值基本一致, 边界清晰且能量集中, 同时左侧小尺度(图 6e)异常亦有一定反映。整体来看, DDI-WRI 反演结果的假象水平显著优于 DDI-FWI, 背景更加平滑, 说明双差约束与波场重构方法的结合能够更好地利用监测与基准数据的差分信息, 从而增强了时移异常体的分辨率。

相比之下, 图 6d 的 DDI-FWI 结果尽管较传统 PRI-FWI 有明显改善, 假象数量有所减少, 但右侧异常体仍存在一定的拖影与模糊, 边界清晰度和幅值恢复程度均逊于 DDI-WRI。尤其在浅部和背景区域, DDI-FWI 结果仍表现出较强的假象干扰, 导致整体对比度不足。综上, DDI 能够显著提高时移反演的鲁棒性, 其中 DDI-WRI 在相同迭代次数下表现最优, 既能准确恢复主要异常体的位置与几何形态, 又能有效抑制假象, 为后续的四维地震储层动态监测提供了更可靠的模型基础。

3　讨论与结论

本文针对 CO_2 地质封存监测中的时移地震反演问题, 研究对比了全波形反演(FWI)与波场重构反演(WRI)在并行反演(PRI)与双差反演(DDI)两种策略下的表现。研究表明, FWI 在理论上能够实现高精度速度反演, 但其对初始模型和低频成分依赖较强, 极易受到“跳周”现象影响, 导致反演结果中出现假象、异常体错位及幅值低估。相比之下, WRI 通过引入波动方程惩罚项, 扩大了解的寻优空间, 有效缓解了反演的非线性问题, 在相同迭代次数下能更稳定地恢复异常体的位置与几何形态。

从反演策略角度看, DDI 相较于 PRI 能更好地利用基准与监测数据的差异信息, 减弱了两次独立

反演的收敛差异对结果的影响，从而显著降低假象并提高对速度变化的分辨能力。数值实验表明，DDI-WRI效果最佳，不仅在强异常区能准确恢复幅值与边界，在弱异常区也能捕捉到与真实模型一致的响应，而DDI-FWI虽较PRI-FWI有所改善，但仍存在高频响应不足、拖影和模糊问题。

综合来看，WRI较FWI在时移地震反演中更具鲁棒性和稳定性，DDI策略能够进一步提升反演精度和抗噪能力，两者结合的DDI-WRI方法在幅值恢复、边界清晰度及假象压制方面均表现最佳，显示出在CO_2地质封存动态监测中的广阔应用前景。

参考文献(References)：

[1] Herzog H, Eliasson B, Kaarstad O. Capturing greenhouse gases[J]. Scientific American, 2000, 282(2): 72−79.

[2] Bachu S. CO_2 storage in geological media: Role, means, status and barriers to deployment[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(2): 254−273.

[3] 彭文睿, 邢磊, 李倩倩, 等. CO_2海底咸水层封存波及范围地震监测方法研究: 以Sleipner CCS项目为例 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(1): 210−224.
Peng W R, Xing L, Li Q Q, et al. On seismic monitoring of the scope of CO_2 storage in the seabed saline aquifers: Taking the Sleipner CCS project as an example[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(1): 210−224.

[4] 陈龙. CO_2地质封存四维地震监测技术中属性分析研究和应用 [D]. 西安: 西北大学, 2016.
Chen L. Research and application of attribute analysis in four-dimensional seismic monitoring technology of CO_2 geological storage[D]. Xi'an: Northwest University, 2016.

[5] 赵海英, 陈沅忠, 李彦鹏, 等. CO_2地质封存时移垂直地震监测技术 [J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 3095−3102.
Zhao H Y, Chen Y Z, Li Y P, et al. CO_2 monitoring with time-lapse vertical seismic profile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 3095−3102.

[6] Fawad M, Mondol N H. Monitoring geological storage of CO_2: A new approach[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 5942.

[7] Chadwick J, Perfit M, Ridley I, et al. Magmatic effects of the Cobb hot spot on the Juan de Fuca Ridge[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2005, 110(B3): 2003JB002767.

[8] Eiken O, Stenvold T, Zumberge M, et al. Gravimetric monitoring of gas production from the Troll field[J]. Geophysics, 2008, 73(6): WA149−WA154.

[9] Arts R, Eiken O, Chadwick A, et al. Monitoring of CO_2 injected at Sleipner using time-lapse seismic data[J]. Energy, 2004, 29(9/10): 1383−1392.

[10] Furre A K, Eiken O, Alnes H, et al. 20 years of monitoring CO_2-injection at Sleipner[J]. Energy Procedia, 2017, 114: 3916−3926.

[11] 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(6): 707−715.
Chen X H, Mou Y G. 4D seismic reservoir monitoring technology and its application[J]. OGP, 1998, 33(6): 707−715.

[12] Gluck S, Deschizeaux B, Mignot A, et al. Time-lapse impedance inversion of post-stack seismic data[G]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2000, Society of Exploration Geophysicists, 2000:1509−1512.

[13] 周长礼, 王守东, 尹彦琼, 等. 时移地震全波形反演方法研究 [C]//2015年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, 2015.
Zhou C L, Wang S D, Yin Y Q, et al. Research on time-lapse seismic full waveform inversion method[C]//Proceedings of the 2015 Joint Annual Meeting of Earth Sciences (XIV) — Session 40: Geophysical Exploration of Oil, Gas and Coal Fields, 2015.

[14] Abubakar A, van den Berg P M, Fokkema J T. A feasibility study on nonlinear inversion of time-lapse seismic data[G]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2001, Society of Exploration Geophysicists, 2001: 1664−1667.

[15] 付欣, 张小龙, 孙云强, 等. 基于双差反演策略的时移地震AVO反演 [J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(4): 888−896, 741.
Fu X, Zhang X L, Sun Y Q, et al. Time-lapse seismic AVO inversion based on a doubledifference inversion strategy[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(4): 888−896, 741.

[16] 李冬. CO_2封存储层精细描述及运移监测方法研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
Li D. Study on high-precision description of storage reservoir and CO_2 migration monitoring[D]. Beijing: China University of Mining & Technology(Beijing), 2021.

[17] Yang D, Liu F Q, Morton S, et al. Time-lapse full-waveform inversion with ocean-bottom-cable data: Application on Valhall field[J]. Geophysics, 2016, 81(4): R225−R235.

[18] Fu X, Romahn S, Innanen K A. Double-wavelet time-lapse full-waveform inversion[J]. Canadian Journal of Exploration Geophysics, 2023, 46(1): 1−19.

[19] Zhang Z G, Huang L J. Double-difference elastic-waveform inversion with prior information for time-lapse monitoring[J]. Geophysics, 2013, 78(6): R259−R273.

[20] Tarantola A. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation[J]. Geophysics, 1984, 49(8): 1259−1266.

[21] Pratt R G. Seismic waveform inversion in the frequency domain; Part 1, Theory and verification in a physical scale model[J]. Geophysics, 1999, 64(3): 888−901.

[22] 王延光, 蔺玉曌, 李振春, 等. 基于波场重构的早至波波形反演 [J]. 地球物理学进展, 2021, 36(1): 290−293.
Wang Y G, Lin Y Z, Li Z C, et al. Early arrival waveform inversion based on wavefield reconstruction[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(1): 290−293.

[23] Van Leeuwen T, Herrmann F J. Mitigating local minima in full-waveform inversion by expanding the search space[J]. Geophysical Journal International, 2013, 195(1): 661−667.

[24] Van Leeuwen T, Herrmann F J, Peters B. A new take on FWI-wavefield reconstruction inversion[C]//76th EAGE Conference and Exhibition 2014, European Association of Geoscientists & Engineers, 2014: 1−5.

[25] Fang Z L, Lee C Y, Silva C D, et al. Uncertainty quantification for

wavefield reconstruction inversion[C]//Madrid: 77th EAGE Conference and Exhibition 2015, 2015: 1−5.

[26] Van Leeuwen T, Herrmann F J. A penalty method for PDE-constrained optimization in inverse problems[J]. Inverse Problems, 2016, 32(1): 015007.

[27] da Silva N V. Automatic wavefield reconstruction inversion[C]// New Orleans:SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015, Society of Exploration Geophysicists, 2015: 1332−1336.

[28] 蔺玉婴, 李振春, 张凯, 等. 基于新的惩罚因子算法的波场重构反演 [J]. 地球物理学报, 2018, 61(10): 4100−4109.
Lin Y Z, Li Z C, Zhang K, et al. Time domain wavefield reconstruction inversion based on new penalty scalar algorithm[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(10): 4100−4109.

[29] Li Z C, Lin Y Z, Zhang K, et al. Time-domain wavefield reconstruction inversion[J]. Applied Geophysics, 2017, 14(4): 523−528.

[30] Rizzuti G, Louboutin M, Wang R R, et al. A dual formulation for time-domain wavefield reconstruction inversion[C]// San Antonio: SEG Technical Program Expanded Abstracts 2019, Society of Exploration Geophysicists, 2019: 1480-1485.

[31] Lin Y Z, Liu H S, Xing L, et al. Time-domain wavefield reconstruction inversion solutions in the weighted full waveform inversion form[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5923514.

[32] Tarantola A. A strategy for nonlinear elastic inversion of seismic reflection data[J]. Geophysics, 1986, 51(10): 1893−1903.

[33] Plessix R E. A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications[J]. Geophysical Journal International, 2006, 167(2): 495−503.

[34] Bezdek J C, Hathaway R J. Some notes on alternating optimization[C]// Berlin:Advances in Soft Computing—AFSS 2002, Springer, 2002: 288−300.

[35] Lin Y Z, van Leeuwen T, Liu H S, et al. A fast wavefield reconstruction inversion solution in the frequency domain[J]. Geophysics, 2023, 88(3): R257−R267.

[36] Daley T M, Myer L R, Peterson J E, et al. Time-lapse crosswell seismic and VSP monitoring of injected CO_2 in a brine aquifer[J]. Environmental Geology, 2008, 54(8): 1657−1665.

[37] Saito H, Nobuoka D, Azuma H, et al. Time-lapse crosswell seismic tomography for monitoring injected CO_2 in an onshore aquifer, nagaoka, Japan[J]. Exploration Geophysics, 2006, 37(1): 30−36.

[38] Ghaderi A, Landrø M. Estimation of thickness and velocity changes of injected carbon dioxide layers from prestack time-lapse seismic data[J]. Geophysics, 2009, 74(2): O17−O28.

A time-lapse seismic inversion method based on wavefield reconstruction inversion for the dynamic monitoring model data of geologic CO_2 sequestration

TANG He-Hao, LIN Yu-Zhao, XING Lei, ZHANG Jin

(*College of Marine Geosciences*, *Ocean University of China*, *Qingdao* 266100, *China*)

Abstract: In the monitoring of geologic CO_2 sequestration, time-lapse seismic data can capture the CO_2 injection-induced subtle changes in CO_2 saturation and associated reservoir physical properties, which are crucial for evaluating the storage safety and effectiveness. Although conventional full-waveform inversion can exploit full-waveform information in time-lapse seismic data, it is highly nonlinear and strongly dependent on the initial model and low-frequency components, rendering it prone to cycle skipping. Hence, this study incorporated wavefield reconstruction inversion (WRI) into time-lapse seismic inversion, combined with parallel and double-difference inversion strategies, to establish an inversion process for monitoring geologic CO_2 sequestration. Model test results show that the WRI, based on the parallel inversion strategy, effectively suppressed artifacts while also recovering the geometric morphologies of velocity-change zones. The double-difference inversion strategy further enhanced inversion stability. The WRI, based on the double-difference strategy, accurately captured velocity perturbations in both strong and weak velocity-change zones, yielding significantly reduced artifacts and outperforming conventional methods in both boundary clarity and amplitude recovery. Overall, this inversion method improves the inversion accuracy of the target area while also enhancing the identifiability of reservoir changes, serving as a robust and reliable technical approach for 4D seismic monitoring of geologic CO_2 sequestration.

Key words: geological CO_2 storage; time-lapse seismic inversion; full-waveform inversion; wavefield reconstruction inversion(WRI)

(本文编辑: 叶佩)