doi: 10.11720/wtyht.2026.1315
王海, 徐夷鹏, 赵爱国, 等. 反射波波形反演技术在西部山前带探区中的应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(1): 128-136. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1315
Wang H, Xu Y P, Zhao A G, et al. Application of reflection waveform inversion technology to exploration areas in western piedmont zones[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(1): 128-136. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1315

# 反射波波形反演技术在西部山前带探区中的应用

王海, 徐夷鹏, 赵爱国, 王胜阁, 刘鹏翔, 王蓬
(中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营 257022)

**摘 要:** 西部山前带探区作为油气勘探的重要战略接替区, 其"双复杂"地表条件(复杂地形与复杂构造)及低信噪比地震资料严重制约了地震成像精度与钻井成功率, 亟须针对性的反演技术突破。本文以西部山前带工区为研究对象, 该工区地表类型复杂, 涵盖山丘、砾石区及雅丹地貌, 进一步加剧了地震资料的低品质特征。现有初至波波形反演依赖初至波旅行时拟合, 受西部山前带近地表非均质性影响, 存在子波一致性差、地表一致性差的两大核心局限, 浅层速度建模精度不足, 难以依赖超大偏移距数据以及初至波中丰富的低频信息对中深层速度进行反演; 反射波波形反演通过挖掘反射波中深层信息, 优化目标函数, 对低品质资料具有更强的适应性。基于此, 本文将反射波波形反演应用于工区, 旨在提升双复杂条件下的偏移速度反演精度, 为改善西部山前带探区地震成像质量、支撑油气藏精细描述提供技术参考。通过模型和工区测试, 反射波波形反演的结果能够应对山前带的低品质数据, 提升中深层速度的整体精度。

**关键词:** 双复杂地表; 低信噪比地震资料; 低频反演; 反射波波形反演
**中图分类号:** P31; P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)01-0128-09

## 0 引言

在油气勘探开发领域, 高精度、高分辨率成像技术对于揭示复杂地质条件下的构造与岩性细节具有关键支撑作用, 其精度直接影响勘探目标的精准定位。随着勘探程度的持续深化, 目标区域已逐步从浅中层向深层、超深层延伸。然而, 深层地震资料普遍存在信噪比低、有效信号能量衰减显著等问题, 加之偏移速度模型精度不足, 严重制约了深层偏移成像质量, 进而对油气藏精细描述及钻井成功率形成瓶颈, 因此提升速度建模精度成为实现深层高精度偏移成像的核心前提。

全波形反演技术基于波动方程理论, 相较于射线理论, 能够更精准地刻画地震波在地下介质中的传播过程, 可实现速度、密度、品质因子 $Q$ 值等多参数同步反演[1-5]。20 世纪 80 年代, Lailly[6] 与 Tarantola[7] 提出时间域全波形反演算法, 构建了相对完整的理论体系; 20 世纪 90 年代, Pratt[8] 将其拓展至频率域, 但受限于当时的硬件计算能力, 相关研究多停留在理论探索阶段。近年来, 随着计算机技术的飞速发展与处理能力的指数级提升, 全波形反演在实际资料中的应用逐步迈向实用化。

海洋地震资料因低频信息丰富、信噪比高等优势, 更适配于全波形反演; 而陆地资料的应用仍面临诸多挑战[9-11]。常规全波形反演主要依赖潜波重构

**收稿日期:** 2025-09-29; **修回日期:** 2025-11-03
**基金项目:** 山东省青年科技人才托举工程 (SDAST2025QTB055); 中石化胜利分公司项目"粘声介质双参数全波形反演技术研究"(YKB2526); 中石化胜利分公司项目"西部双复杂探区全波形反演技术研究"; 山东省自然科学基金项目"面向非常规油气藏的多模态约束陆上全波形反演方法研究"(ZR2025QC452); 东营市自然科学基金项目"动态迭代加速的粘声介质全波形反演方法研究"(2025ZR027); 山东省泰山产业领军人才课题 (tscx202312059)
**第一作者:** 王海 (2000-), 男, 2022 年毕业于成都理工大学, 现任中国石化胜利油田分公司物探研究院工程师, 主要研究方向为偏移速度分析、高精度成像技术等。
**通讯作者:** 徐夷鹏 (1995-), 男, 2024 年中国石油大学(华东)博士毕业, 现任中国石化工胜利油田分公司物探研究院主管工程师、助理研究员, 山东省青年科技托举人才, 从事地震资料处理方法研究工作, 主要研究方向为全波形反演、最小二乘逆时偏移、各向异性正演等。Email: xyp1759029715@163.com

地下介质参数, 但陆地地震勘探受限于观测系统, 往往缺乏大偏移距数据与低频信息, 导致反演深度受限。为此, Xu 等[12] 提出反射波波形反演方法: 在初始模型平滑假设下, 基于一阶 Born 近似通过偏移与反偏移提取反射波信息, 以反射波替代潜波实现深层介质参数更新。但反偏移记录与野外观测记录的振幅特征存在显著偏差, 使得常规 $L_2$ 范数误差函数难以有效适配。针对这一问题, Ma 等[13] 通过动态时差校正技术提取走时信息, 规避振幅差异的干扰, 提出波动方程反射走时反演方法, 实现速度场低波数成分的有效恢复; 付继有等[14] 基于相位拟合的互相关函数削弱数据振幅对反演的影响, 有效克服局部极值问题, 提升了反演过程的稳定性。

西部山前带探区作为油气勘探的重要战略接替区, 其“双复杂”地表条件(复杂地形与复杂构造)及低信噪比地震资料严重制约了地震成像精度与钻井的成功率, 亟须针对性的反演技术突破[15]。初至波波形反演与反射波波形反演(reflection waveform inversion, RWI)是现阶段该类区域速度建模与成像的主要应用手段。其中, 初至波波形反演依托波动方程框架, 在浅层相对简单地表、高信噪比资料场景中仍有应用价值; 而反射波波形反演因能适配探区低品质资料, 覆盖中深层勘探目标, 更成为解决“双复杂”条件下速度建模难题的关键手段, 二者共同支撑起该探区现阶段的反演技术应用体系。初至波波形反演与反射波波形反演存在技术共性: 二者均以波动方程正演建模为核心理论基础, 遵循“正演模拟—残差计算—模型更新”的迭代优化逻辑, 通过对比模拟数据与工区观测数据的残差更新速度模型[16]; 均依赖初始速度模型(如工区采用的层析速度模型)保障反演收敛性, 且反演精度与初始模型合理性相关; 同时均可向黏声介质扩展, 通过引入品质因子相关参数量化声波能量损耗, 适配探区砾石区等强吸收衰减的地质条件。

二者的核心差异则体现在对探区“双复杂”条件与低品质资料的适配性上: 初至波波形反演仅利用初至波(直达波/折射波), 对资料品质、子波一致性与地表一致性要求严苛, 无法应对探区低信噪比、子波畸变、近地表速度剧烈变化的低品质资料与复杂条件, 在这种条件下, 难以依赖超大偏移距数据以及初至波中丰富的低频信息对中深层速度进行反演, 反演结果可靠性低[17]。

反射波波形反演对低品质资料具有更强适应性, 核心源于 3 方面原理设计: 一是波场分离机制, RWI 基于 Born 近似将总波场分解为背景场(直达波、折射波, 低品质资料中此类干扰占比高)与散射场(反射波, 承载中深层地质信息), 可针对性剔除背景场干扰, 从低信噪比、多干扰的资料中提取反射波有效信号, 减少无效干扰对反演的影响; 二是目标函数适配设计, 低品质资料常伴随显著振幅畸变, RWI 摒弃对振幅敏感的传统 $L_2$ 范数目标函数, 通过相位互相关函数聚焦相位匹配——因低品质资料中相位信息仍能反映地下介质速度界面特征, 以相位一致性替代振幅一致性, 大幅降低振幅畸变带来的反演误差; 三是反演依赖的波场特性, RWI 以反射波为核心反演波场, 反射波可携带中深层地质信息, 即便浅层资料受地表复杂条件(山丘、砾石区、雅丹地貌)影响品质劣化, 中深层反射波仍能保留关键速度信息, 为反演提供可靠依据, 而非依赖易受干扰的浅层初至波, 从原理上提升了对低品质资料的耐受度[18]。

在山前带探区应用反射波波形反演具有重要实践价值: 相较于初至波波形反演, 反射波波形反演对低品质资料具有更强的适应性, 能够通过挖掘反射波蕴含的中深层地质信息, 有效规避初至波在复杂地表条件下的子波与地表一致性局限, 提升对横向变速带及复杂构造的敏感性。本文以西部山前带工区为研究对象, 该工区地表类型复杂, 涵盖山丘(占炮点面积 45%, 表层风化剧烈, 检波器埋置条件差)、砾石区(占 45%, 砾石覆盖厚度大且吸收衰减强烈, 导致资料品质劣化)及雅丹地貌(占 10%, 地表起伏剧烈、激发与接收条件恶劣), 施工难度显著高于周边区域, 进一步加剧了地震资料的低品质特征。现有初至波波形反演因子波一致性与地表一致性不足, 难以在该类“双复杂”区域取得有效结果; 而反射波波形反演对低品质资料的适应性, 使其能够针对性地解决高精度偏移速度反演难题。基于此, 本文将反射波波形反演应用于工区, 旨在提升“双复杂”条件下偏移速度反演精度, 为改善西部山前带探区地震成像质量提供技术参考。

## 1　基本原理

在声波反射波波形反演中, 声波正演与 Born 近似是实现反射波信息有效利用的关键环节。声波正演的核心作用是构建“地下介质模型→地表地震响应”的映射关系。反射波波形反演的本质是通过最小化观测数据与模拟反射数据的差异更新介质参数, 而正演正是基于当前模型生成模拟反射波场的过程, 其理论基础是声波波动方程, 该方程描述了声

波在非均匀介质中的传播规律，是正演模拟的数学框架。Born近似则用于简化反射波场的计算。地下反射波本质上是地震波在介质扰动处的散射响应，而介质参数的强非线性会导致反演陷入局部极值。Born近似通过将总波场分解为背景场（未受扰动的直达波/折射波）与散射场（反射波为主），假设扰动较小且散射场是背景场与介质扰动的线性叠加，从而将非线性问题线性化，使反射波信息得以从总波场中分离并量化，为利用反射波更新深层介质参数提供可解的数学形式，这个过程也被称为反偏移。声波波动方程和反偏移方程可写为如下形式：

$$\begin{cases}\dfrac{1}{v_{\mathrm{p}}^2(\boldsymbol{x})}\dfrac{\partial^2 p_0(\boldsymbol{x},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})}{\partial t^2}-\nabla^2 p_0(\boldsymbol{x},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})=s(\boldsymbol{x},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}}),\\ d_{\mathrm{cal}}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{r}},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})=\Delta p(\boldsymbol{x}_{\mathrm{r}},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})。\end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases}\dfrac{1}{v_{\mathrm{p}}^2(\boldsymbol{x})}\dfrac{\partial^2\Delta p(\boldsymbol{x},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})}{\partial t^2}-\nabla^2\Delta p(\boldsymbol{x},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})=\\ \qquad\dfrac{\partial^2 p_0(\boldsymbol{x},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})}{\partial t^2}\dfrac{2m_{\mathrm{image}}(\boldsymbol{x})}{v_{\mathrm{p}}^2(\boldsymbol{x})},\\ d_{\mathrm{cal}}^{\mathrm{ref}}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{r}},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})=\Delta p(\boldsymbol{x}_{\mathrm{r}},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})。\end{cases} \tag{2}$$

式(1)中：$\boldsymbol{x}$为空间坐标；$t$为时间；$p_0$为背景场；$p$为扰动场；$v_{\mathrm{p}}$为纵波速度；$d_{\mathrm{cal}}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{r}},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})$为模拟数据。式(2)中：$d_{\mathrm{cal}}^{\mathrm{ref}}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{r}},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})$为散射数据；$m$为反射系数，其表达式为$m_{\mathrm{image}}(\boldsymbol{x})=\dfrac{\Delta v(\boldsymbol{x})}{v_{\mathrm{p}}(\boldsymbol{x})}$。

反射波波形反演的核心是通过迭代优化地下速度模型，使模拟反射波场与观测反射波场在波形特征（包括振幅、相位、走时等）上达成一致。由于反射波在传播过程中易受地表非均质性、吸收衰减及噪声干扰，其振幅与相位常存在失真，因此目标函数的设计需针对性适配反射波特性。反射波波形反演通过极小化观测数据和模拟数据的反射波信息误差来更新地下速度。其极小化目标泛函如下：

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{m})=\frac{1}{2}\int_0^T\left\|d_{\mathrm{cal}}^{\mathrm{ref}}-d_{\mathrm{obs}}^{\mathrm{ref}}\right\|^2\mathrm{d}t, \tag{3}$$

式中：$d_{\mathrm{cal}}^{\mathrm{ref}}$为模拟数据反射波信息（由式(1)、(2)获得）；$d_{\mathrm{obs}}^{\mathrm{ref}}$为观测数据反射波信息（通过对观测数据加窗或者对模型数据反偏移获得）。RWI中$\dfrac{\partial\boldsymbol{E}}{\partial V_{\mathrm{p}}}$的梯度公式可以通过伴随方法得到，时间二阶的速度应力方程下RWI的梯度公式如下：

$$\frac{\partial\boldsymbol{E}}{\partial V_{\mathrm{p}}}=\frac{2}{(v_{\mathrm{p}})^2}\int_0^T\left[\frac{\partial^2 d_{\mathrm{cal}}}{\partial t^2}d_{\mathrm{cal}}^{\mathrm{ref}*}+\frac{\partial^2 d_{\mathrm{cal}}^{\mathrm{ref}}}{\partial t^2}d_{\mathrm{cal}}^{*}\right]\mathrm{d}t, \tag{4}$$

式中：$d_{\mathrm{cal}}^{*}$为反传波场；$d_{\mathrm{cal}}^{\mathrm{ref}*}$为反传反射波场。反射波波形反演的波场反传，是将观测反射波与模拟反射波的残差信息从地表反向传播至地下的过程，其核心作用是将地表的波形误差“映射”到地下对应位置，为模型梯度计算提供关键依据。反传波场公式：

$$\begin{cases}\dfrac{1}{v_{\mathrm{p}}^2(\boldsymbol{x})}\dfrac{\partial^2 p_0(\boldsymbol{x},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})}{\partial t^2}-\nabla^2 p_0(\boldsymbol{x},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})=d_{\mathrm{cal}}^{\mathrm{ref}}-d_{\mathrm{obs}}^{\mathrm{ref}},\\ d_{\mathrm{cal}}^{*}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{r}},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})=\Delta p(\boldsymbol{x}_{\mathrm{r}},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})。\end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases}\dfrac{1}{v_{\mathrm{p}}^2(\boldsymbol{x})}\dfrac{\partial^2\Delta p(\boldsymbol{x},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})}{\partial t^2}-\nabla^2\Delta p(\boldsymbol{x},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})=\\ \qquad\dfrac{\partial^2 p_0(\boldsymbol{x},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})}{\partial t^2}\dfrac{2m_{\mathrm{image}}(\boldsymbol{x})}{v_{\mathrm{p}}^2(\boldsymbol{x})},\\ d_{\mathrm{cal}}^{\mathrm{ref}*}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{r}},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})=\Delta p(\boldsymbol{x}_{\mathrm{r}},t;\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})。\end{cases} \tag{6}$$

式中：$d_{\mathrm{cal}}^{*}$为反传波场值。当$E(\boldsymbol{m})$中$\boldsymbol{m}$为速度$v$时，迭代公式如下：

$$v_{k+1}=v_k+\alpha_k d_k, \tag{7}$$

式中：$\alpha_k$为第$k$步步长；$d_k$为第$k$步的搜索方向。综上所述，反射波波形反演的流程可概括为：①通过式(1)、(2)获得模拟数据反射波信息；②求取观测数据反射波信息与式(1)、(2)得到的模拟数据反射波信息的误差，并通过式(3)得到两个数据的残差之和；③用数据残差替换伴随方程的震源项，得到相应的反传数据$d_{\mathrm{cal}}^{\mathrm{ref}*}$、$d_{\mathrm{cal}}^{*}$，并根据式(4)求取相应梯度；④根据式(7)对$v_{\mathrm{p}}$进行更新。

## 2 西部山前带反射波波形反演针对性技术

数据预处理是反射波波形反演的基础环节，其质量直接决定后续反演能否从“双复杂”资料中提取有效反射波信息，核心影响体现在以下两方面：①噪声压制与信号分离效果，西部山前带资料存在低信噪比问题，且受面波、随机噪声干扰显著，若面波剔除不彻底、软阈值小波去噪强度不当（过弱则残留噪声，过强则损伤反射波有效信号），会导致后续反射波场提取时“有效信号—噪声”混淆，使模拟反射波与观测反射波的残差计算偏差增大，最终降低速度模型更新精度；②振幅校正的地形适配性，本文指出工区涵盖山丘（45%）、砾石区（45%）、雅丹地貌（10%），不同地形的振幅畸变机制差异显著，山丘区因检波器埋置条件差导致能量不均，砾石区因厚层覆盖导致能量强衰减，若未按地形分区实施定向振幅校正（如砾石区未针对性补偿吸收衰减，山丘区未平衡检波器耦合差异），会加剧反射波振幅失真，干扰残差计算，导致梯度更新方向偏差，影响中深层速度框架的准确性。因此，相位互相关目标函数能够最大程度降低振幅失真的影响，采用相位互相关目标函数是更加稳妥的方式。

初始模型约束的合理性直接决定反演能否规避局部极值, 核心影响体现在: ①初始层析模型的精度基础, 约束项的作用是“平衡初始模型偏差与迭代方向”, 若初始层析速度模型本身因近地表非均质性存在严重误差(如山丘区近地表速度横向变化超 1 000 m/s, 层析反演未充分校正), 即便施加约束, 也难以修正深层速度框架偏差。例如, 本文中提到工区层析速度已达较高精度, 但仍需 RWI 进一步优化; 若层析模型存在明显偏差(如高速体位置偏移), 约束项可能会“锁定”错误的初始框架, 导致 RWI 无法有效更新深层速度, 反演结果与地质认识不符。②约束权重的取值适配性, 需通过工区测试确定最优值。权重取值直接影响约束强度, 权重过高会过度依赖初始层析模型, 限制反射波信息对模型的优化作用(如中深层储层段速度细节无法通过 RWI 细化); 权重过低则无法有效规避局部极值, 导致反演过程中速度模型出现“异常跳变”。最优权重需适配“双复杂”资料, 若权重取值脱离工区实际, 会直接削弱约束项的作用, 降低反演稳定性。

与此同时, 本文技术的实施方案包含正演观测系统、迭代次数、频率递进等参数设置, 其科学性决定反演效率与精度的平衡。关键影响如下: 正演观测系统的地形适配性, 本文提到正演基于“小平滑面”设置观测系统, 简化非平面校正, 该设置需与工区地表起伏特征适配。若平滑面过度简化(如未考虑雅丹地貌区剧烈起伏), 会导致正演模拟的反射波场与实际观测波场偏差增大, 残差计算失真; 若平滑面保留过多地形细节, 会增加计算量且可能引入额外噪声, 降低反演效率。迭代次数与频率需要保证递进的协同性, 具体策略需保障“低频建框架—中频细化”的协同。若低频迭代未充分收敛(如仅迭代 5 次), 宏观速度框架存在偏差, 后 20 次中频细化会在错误框架上叠加细节, 导致深层速度整体偏移; 若频率递进间隔不合理(如直接从 2 Hz 跳至 15 Hz), 会跳过关键的中频过渡阶段, 导致反演陷入局部极值。

西部山前带“双复杂”资料(复杂地形引发的近地表非均质性, 复杂构造导致的低信噪比、振幅畸变、相位跳变), 主要以 2 方面核心适配技术为主。

1)目标函数优化技术: 针对双复杂资料普遍存在振幅畸变的问题, 摒弃对振幅敏感的传统 $L_2$ 范数目标函数, 采用相位互相关目标函数, 通过相位匹配替代振幅匹配, 降低振幅误差对反演的干扰。其数学表达式为:

$$E(\boldsymbol{m})=\frac{1}{2}\int_t\left|corr\left(\phi_{\mathrm{cal}}^{\mathrm{ref}}(\boldsymbol{x},t;\boldsymbol{m}),\phi_{\mathrm{obs}}^{\mathrm{ref}}(\boldsymbol{x},t)\right)-1\right|^2\mathrm{d}t, \quad (8)$$

式中: $\boldsymbol{m}$ 为地下速度模型参数(核心为纵波速度 $v_{\mathrm{p}}$); $\phi_{\mathrm{cal}}^{\mathrm{ref}}$为模拟反射波相位; $\phi_{\mathrm{obs}}^{\mathrm{ref}}$为观测反射波相位; $corr(\cdot)$为相位互相关运算; $t$ 为时间变量。该公式通过最大化模拟与观测反射波的相位一致性构建残差, 即便双复杂资料振幅误差较大, 仍可将速度反演误差控制在 8%~10%, 适配低品质资料的相位保留特性。

2) 初始模型约束技术: 双复杂资料对应的层析初始速度模型$\boldsymbol{m}_{\mathrm{tomo}}$易因近地表非均质性存在误差, 直接反演易陷入局部极值。为此在 RWI 梯度更新公式中引入层析速度约束项, 平衡初始模型偏差与迭代方向, 公式如下:

$$\frac{\partial E}{\partial \boldsymbol{m}}=\frac{2}{v_{\mathrm{p}}^2}\int_t p_0^*(\boldsymbol{x},t;\boldsymbol{m})\cdot\Delta p^*(\boldsymbol{x},t;\boldsymbol{m})\mathrm{d}t+\lambda\cdot(\boldsymbol{m}_{\mathrm{tomo}}-\boldsymbol{m}_{\mathrm{rwi}}), \quad (9)$$

式中: $\dfrac{\partial E}{\partial \boldsymbol{m}}$ 为目标函数对速度模型的梯度, 为伴随波场; $\Delta p^*$ 为模拟与观测数据的残差波场; $\lambda=0.2$为约束权重(经工区测试适配双复杂资料的最优值); $\boldsymbol{m}_{\mathrm{rwi}}$为 RWI 当前迭代速度模型。该约束使初始迭代的速度误差下降, 保障中深层复杂构造区(如逆冲推覆带)速度框架的合理性。

与此同时, 形成了针对西部山前带“双复杂”资料 RWI 的具体实施方案:

1)数据准备与预处理: 输入文件所述“双复杂”区单炮地震记录、层析初始速度模型、地表高程数据; 剔除面波, 软阈值小波去噪压制随机噪声, 按地形分区定向校正振幅(砾石区处理厚层覆盖衰减、山丘区处理检波器耦合差能量不均)。

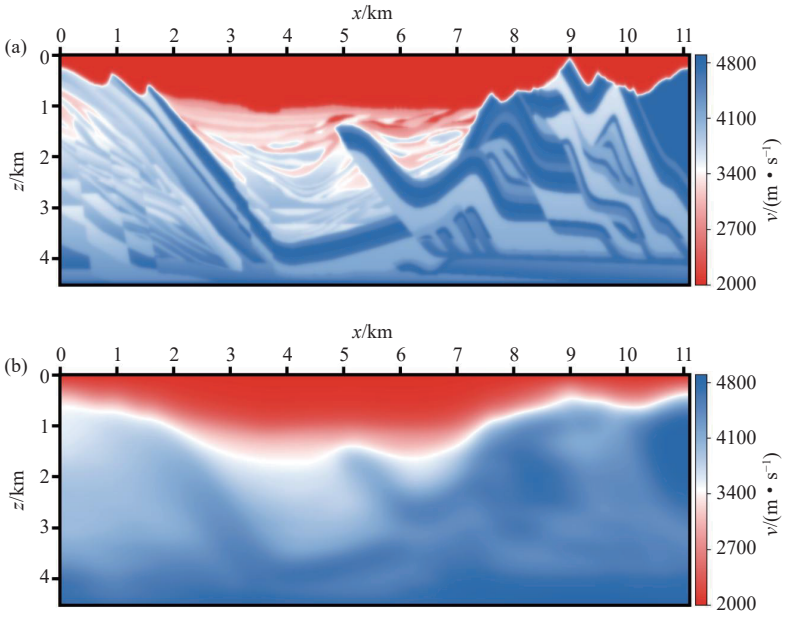
2)反演参数设置与迭代执行: 正演基于小平滑面设置观测系统, 激发—接收点坐标按平滑后地表高程确定, 简化非平面校正; 总迭代 30 次, 前 10 次用 2~8 Hz 数据建立中深层速度宏观框架(校正横向变速带), 后 20 次用 8~15 Hz 中频数据细化储层段(5~8 km)精度, 每次迭代基于相位互相关目标函数与带层析约束的梯度公式更新模型。

3)成果验证与质量控制: 每 2 次迭代输出速度模型, 验证中深层复杂构造区(高速屏蔽区、构造转折处)速度连续性及模型与区域地质认识的匹配度; 最终输出 RWI 速度模型, 确保中深层反演精度提升, 适配小平滑面处理后的地表条件, 为后续逆时偏移成像提供支撑。

## 3　典型模型与工区测试

### 3.1　SEG-Foothill 模型

SEG-Foothill 纵波速度模型(图 1a、b)是针对山




a—速度模型; b—初始速度模型

a—velocity model; b—initial velocity model

**图 1　Foothill 模型**

**Fig. 1　Foothill model**

前带这一类特殊地表条件(地表起伏大、横向速度变化范围 2 500~4 000 m/s)的速度模型, 模型大小为 11 km×4.5 km, 空间采样间隔为 10 m。该模型与工区的地下构造相似性较高, 其结果可以作为后续工区的参考依据。

反射波波形反演所使用的震源产生的主频为 25 Hz 的雷克子波, 采用了 1 ms 的时间采样间隔, 总共进行了 1.60 s 的采样。共 110 炮, 炮间隔为 100 m; 共 1 100 个检波器, 间隔为 10 m。在地表起伏大、横向速度变化范围大的情况下, 起伏地表的地震记录(图 2)与平面地表时的地震记录的形态差异巨大, 与工区的地震记录相似性极高。因近地表高速屏蔽层, 横向 2 km 左侧、横向 7 km 右侧部分有效信号较少, 严重影响后续反射波波形反演、成像。

初至波波形反演应用效果 (图 3a) 存在明显局限: 其仅依赖初至波, 对资料品质、子波及地表一致性要求严苛, 难以适配探区“双复杂”条件与低品质资料; 尤其受高速屏蔽影响时, 不仅高速异常体下部、横向 2 km 左侧、横向 7 km 右侧等地层反演结果差, 而且即便在横向中部 2~7 km 相对优质区域, 表现也不及反射波波形反演 (图 3b), 无法像 RWI 那样在低品质资料与高速屏蔽制约下保障核心区域精度、提升整体速度精度, 难以满足探区勘探需求。

由于高速屏蔽, 逆时偏移(reverse time migration, RTM)的成像结果(图 4)在高速异常体下部、左部、右部地层反演结果较差, 仅中部 2~7 km 处反演结果

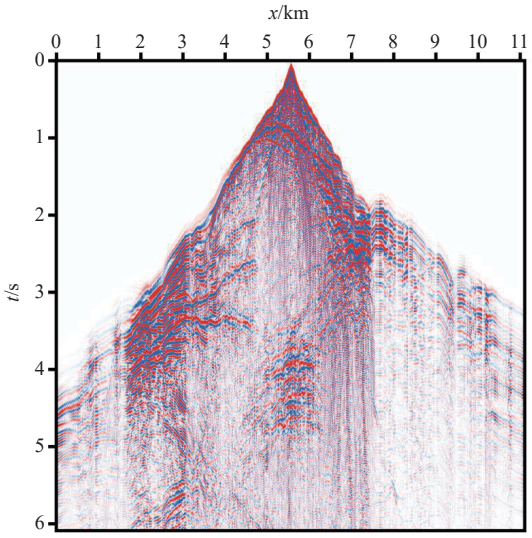


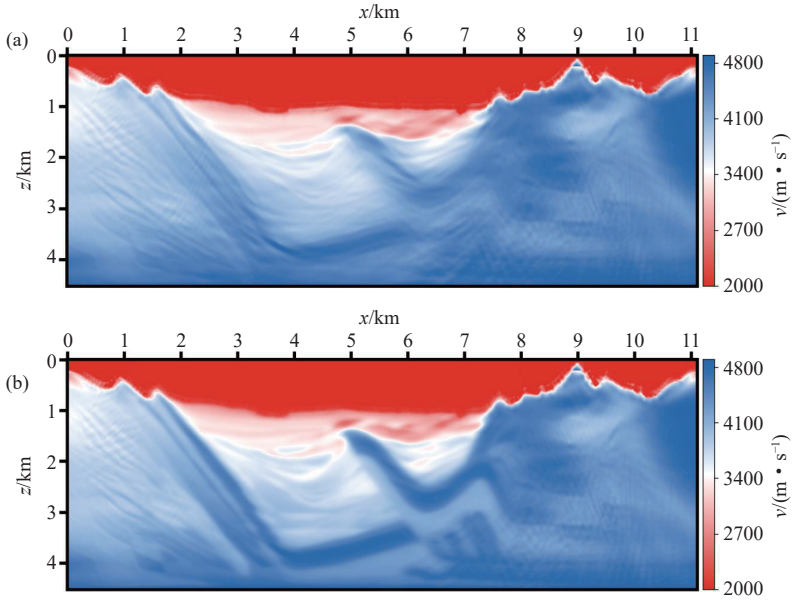

**图 2　Foothill 模型模拟观测数据**

**Fig. 2　Simulated observation data of Foothill model**

精度高。但 RWI 的对应偏移结果依然能够与真实速度的结果保持一致。综上所述, 反射波波形反演理论上能够应对山前带的低品质数据, 提高最终地震成像质量。

### 3.2　工区应用

工区处于克夏断阶带和构造上, 紧邻玛湖凹陷二叠系生烃凹陷, 油气资源丰富。逆冲推覆背斜下部与下二叠统烃源岩地层对接,其下伏隐伏圈闭为有利勘探目标, 成藏条件优越。本次应用展示的 2101 线, 由单炮地震记录可知(图 5), 该山前带数据属于

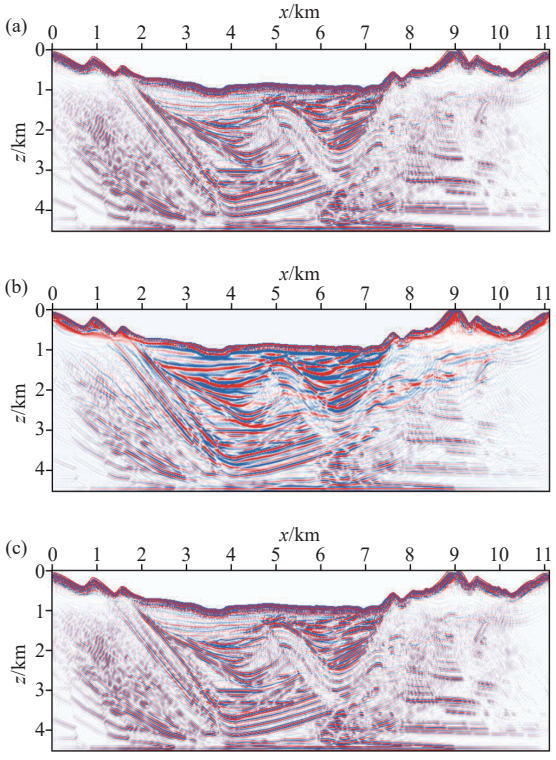



a—初至波波形反演结果;b—反射波波形反演结果

a—first-arrival waveform inversion result; b—RWI result

**图 3　Foothill 模型波形反演结果**

**Fig. 3　Waveform inversion results of Foothill model**



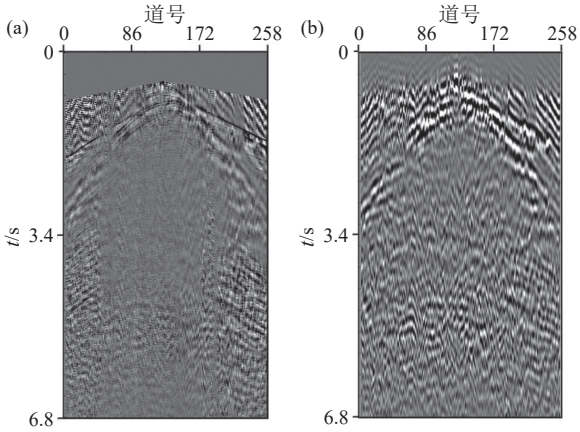

a—真实速度; b—初始速度; c—RWI 速度

a—true velocity; b—initial velocity; c—RWI velocity

**图 4　Foothill 模型 RTM 结果**

**Fig. 4　RTM results of Foothill model**

低品质地震资料。RWI 对低品质资料具有更强适应性, 可针对性提高偏移速度反演精度, 对改善工区地震成像质量具有重要意义。




a—全频段; b—0~15 Hz

a—full frequency band; b—0~15 Hz

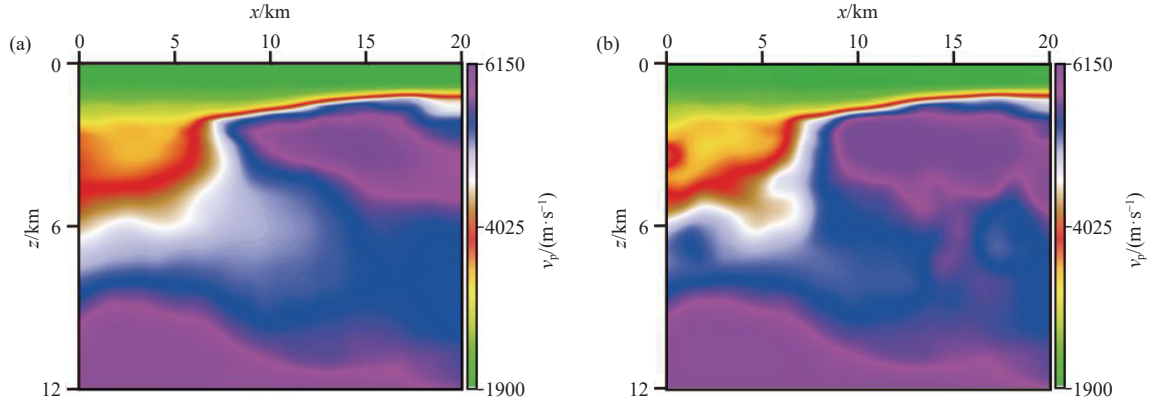
**图 5　工区单炮地震记录**

**Fig. 5　Single-shot seismic records of the work area**

由 2101 线的层析速度(图 6a)及其 3 km 以下的偏移剖面(图 7a)可知, 2101 线的层析速度已非常准确。当层析无法继续提高精度时, 只能使用全波形反演继续提高精度。但经过测试, 初至波波形反演在此探区无法继续提高精度, 符合该区块子波一致性及地表一致性差的认识。因此本文使用层析速度作为初始模型, 进行了反射波波形反演来针对工区的低品质资料, 3 km 以下速度(图 6b)及剖面(图 7b)整体精度得到提升, 其结果也符合现阶段的地质认识。

其中, 高速体下部地层(图 8)提升了地层的连续性, 地层结构更加清晰; 大尺度构造及其周边地层

(图 9)更加清晰、准确。综上所述,针对山前带的低品质工区数据,反射波波形反演的结果符合现阶段的地质认识,提升了中深层的速度整体精度,提高了最终地震成像质量。

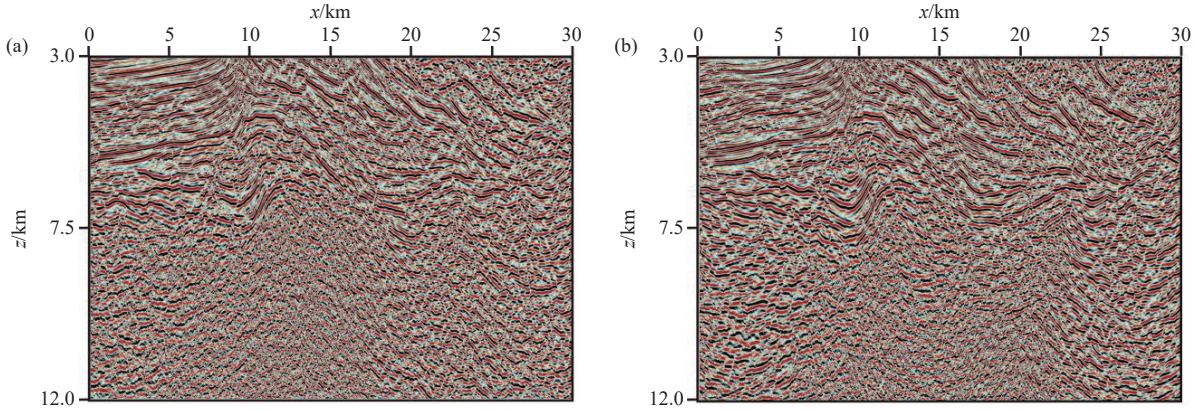



a—层析; b—反射波波形反演

a—tomo; b—reflected waveform inversion

**图 6　工区速度**

**Fig. 6　Velocity of the work area**

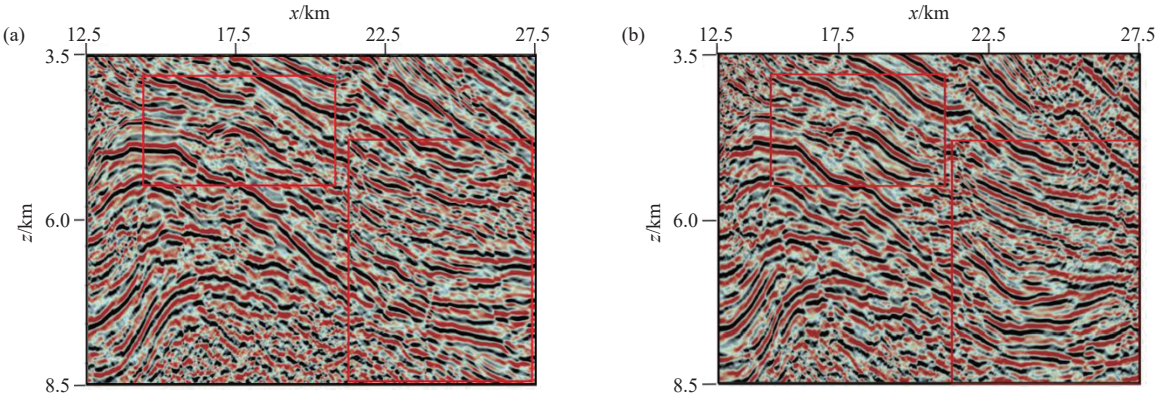



a—层析; b—反射波波形反演

a—tomo; b—reflected waveform inversion

**图 7　工区偏移结果**

**Fig. 7　Migration results of the work area**

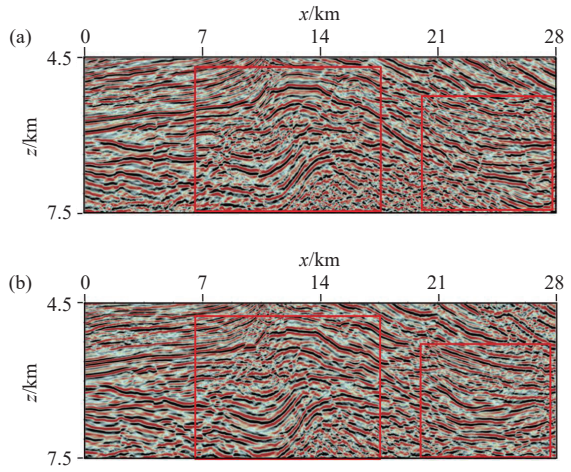



a—层析; b—反射波波形反演

a—tomo; b—reflected waveform inversion

**图 8　高速体下部地层**

**Fig. 8　Strata beneath the high-velocity structure**




a—层析; b—反射波波形反演

a—tomo; b—reflected waveform inversion

**图 9　大尺度构造及其周边地层**

**Fig. 9　Large-scale structures and their surrounding strata**

## 4　结论

西部山前带探区作为油气勘探的重要战略接替区, 其“双复杂”地表条件(复杂地形与复杂构造)及低信噪比地震资料, 严重制约了地震成像精度与钻井成功率, 亟须针对性的反演技术突破。在山前带探区应用反射波波形反演具有重要实践价值, 相较于初至波波形反演, 反射波波形反演对低品质资料具有更强的适应性, 能够通过挖掘反射波蕴含的中深层地质信息, 有效规避初至波在复杂地表条件下的子波与地表一致性局限, 提升对横向变速带及复杂构造的敏感性。

通过 SEG-Foothill 模型测试与工区实践, 验证了 RWI 在西部山前带探区的应用效果。在 Foothill 模型中, 尽管受高速屏蔽影响, RWI 仍有效提升了速度精度, 偏移结果与真实速度模型的偏移结果一致性良好, 证实其理论上能够应对山前带低品质地震数据, 提升成像精度; 在工区应用中, 以层析速度为初始模型, RWI 显著提高了中深层的速度精度及对应偏移剖面质量, 不仅增强了高速体下部地层的连续性, 还使大尺度构造及其周边地层特征更清晰, 结果与当前地质认识相符。综上所述, 反射波波形反演对 “双复杂”(复杂地形与复杂构造)环境下的低信噪比数据具有较强适应性, 能够有效改善西部山前带探区地震成像质量。

**参考文献(References):**


[1] Virieux J, Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics[J]. Geophysics, 2009, 74(6): WCC1−WCC26.

[2] 卞爱飞, 於文辉, 周华伟. 频率域全波形反演方法研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 982−993.
Bian A F, Yu W H, Zhou H W. Progress in the frequency-domain full waveform inversion method[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(3): 982−993.

[3] 陈永芮, 李振春, 秦宁, 等. 波动方程双向照明优化的全波形反演 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 3015−3021.
Chen Y R, Li Z C, Qin N, et al. Full waveform inversion with wave equation bi-directional illumination optimization[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(6): 3015−3021.

[4] 廖建平, 刘和秀, 王华忠, 等. 高分辨率的频率空间域声波全波形速度反演-理论模型 [J]. 地球物理学进展, 2011, 26(5): 1690−1695.
Liao J P, Liu H X, Wang H Z, et al. High resolution acoustic wave full waveform velocity inversion in frequency space domain-theoretical model[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(5): 1690−1695.

[5] 刘斌, 张衡. 海底水合物 OBS 数据全波形反演数值例子 [J]. 地球物理学进展, 2018, 33(1): 379−384.
Liu B, Zhang H. Full waveform inversion of OBS data from ocean gas hydrate: Synthetic example[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(1): 379−384.

[6] Lailly P. The seismic inverse problem as a sequence of before stack migration[C]//Society for Industrial and Applied Mathematics, Expanded Abstracts, 1983: 206-220.

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

[8] 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.

[9] Plessix R E, Milcik P, Rynja H, et al. Multiparameter full-waveform inversion: Marine and land examples[J]. The Leading Edge, 2013, 32(9): 1030−1038.

[10] 丁继才, 孙文博, 黄小刚, 等. 海上地震数据全波形反演实际应用 [J]. 石油物探, 2017, 56(1): 75−80.
Ding J C, Sun W B, Huang X G, et al. The strategies of FWI realization for marine seismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(1): 75−80.

[11] 胡光辉, 李熙盛, 郭丽, 等. 构造约束全波形反演及其海上资料应用 [J]. 石油物探, 2018, 57(4): 592−596, 626.
Hu G H, Li X S, Guo L, et al. Structure-constrained full waveform inversion and its application in marine seismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(4): 592−596, 626.

[12] Xu S, Wang D L, Chen F, et al. Inversion on reflected seismic wave[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012,Society of Exploration Geophysicists, 2012: 1-7.

[13] Ma Y, Hale D. Wave-equation reflection traveltime inversion with dynamic warping and full-waveform inversion[J]. Geophysics, 2013, 78(6): R223−R233.

[14] 付继有, 田坤, 于海铖, 等. 声介质下基于波形互相关的反射波反演方法研究 [J]. 石油物探, 2016, 55(6): 800−807.
Fu J Y, Tian K, Yu H C, et al. The study of correlation-based reflections inversion in acoustic media[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(6): 800−807.

[15] 王西文, 杨午阳, 吕彬, 等. 把握世界物探技术发展现状, 促进地震资料处理、解释技术进步 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 224−239.
Wang X W, Yang W Y, Lyu B, et al. Grasp of the world geophysical technology development status, to promote seismic data processing and interpretation of technological progress[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(1): 224−239.

[16] 汪昆, 吴国忱, 贾宗锋, 等. 反射波时频域地震波形反演方法 [J]. 物探与化探, 2025, 49(5): 1155−1163.
Wang K, Wu G C, Jia Z F, et al. Reflection waveform inversion in the time-frequency domain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(5): 1155−1163.

[17] 杨午阳, 王西文, 雍学善, 等. 地震全波形反演方法研究综述 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 766−776.
Yang W Y, Wang X W, Yong X S, et al. The review of seismic full waveform inversion method[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(2): 766−776.

[18] 国运东. 川东北探区层析与全波形反演联合建模方法及应用 [J]. 物探与化探, 2025, 49(5): 1090−1098.
Guo Y D. Tomography-FWI modeling method and its application for the exploration area of northeastern Sichuan Basin, China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(5): 1090−1098.

## Application of reflection waveform inversion technology to exploration areas in western piedmont zones

WANG Hai, XU Yi-Peng, ZHAO Ai-Guo, WANG Sheng-Ge, LIU Peng-Xiang, WANG Peng
(*Geophysical Research Institute*, *Shengli Oilfield Company*, *Sinopec*, *Dongying* 257022, *China*)

**Abstract:** The exploration areas in western piedmont zones have emerged as an important strategic replacement area for hydrocarbon exploration. However, the complex topography and structure ("dual-complexity"), along with the seismic data with low signal-to-noise ratios (SNR), severely restricted the accuracy of seismic imaging and the success rate of drilling. Therefore, it is imperative to optimize inversion technologies. This study focused on the western piedmont zone, an area characterized by complex surface geology, including hills, gravelly zones, and yardang landforms, further degrading the quality of seismic data. The existing first-arrival waveform inversion technique relies on first-arrival traveltime fitting. However, due to the near-surface heterogeneity in the western piedmont zones, this technique faces two core limitations: insufficient wavelet consistency and insufficient surface consistency. This results in inadequate accuracy of shallow velocity modeling and makes it difficult to invert the velocities of intermediate-to-deep layers using ultra-large-offset seismic data and the abundant low-frequency information contained in first-arrival waves. In contrast, reflection waveform inversion (RWI) exhibits higher adaptability to low-quality data by exploiting information of intermediate-to-deep layers in reflected waves and optimizing the objective functions accordingly. Based on this, this paper applied RWI to the survey area, aiming to enhance the accuracy of migration velocity inversion under dual-complexity conditions and to provide technical reference for improving seismic imaging quality and the detailed depiction of hydrocarbon reservoirs in western piedmont zones. Model and field tests demonstrate that the RWI can handle low-quality data in piedmont zones and improve the overall accuracy of velocities in intermediate-to-deep layers.

**Key words:** complex topography and structures; seismic data with low signal-to-noise ratios; inversion using low-frequency data; reflection waveform inversion(RWI)

(本文编辑: 叶佩)