

基于照明补偿的逆时偏移成像质量改善研究

郝文雅*, 潘纪顺#, 王鑫宇, 牛诏楷, 李玉玺

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年8月24日; 录用日期: 2026年9月17日; 发布日期: 2026年9月24日

摘要

逆时偏移(RTM)作为地震勘探中高精度成像手段, 受照明不均匀影响, 深层及边缘区域成像能量衰减严重。本文通过三层介质模型, 采用均匀背景波场去除直达波干扰, 对比补偿前后的RTM成像剖面, 验证了照明补偿对改善振幅保真度和深部构造分辨率的有效性。实验表明, 补偿后深层界面振幅提升约3~5倍, 成像信噪比显著提高。

关键词

逆时偏移, 照明补偿, 振幅保真度, 成像信噪比

Research on Imaging Quality Improvement of Reverse Time Migration Based on Illumination Compensation

Wenya Hao*, Jishun Pan#, Xinyu Wang, Zhaokai Niu, Yuxi Li

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: August 24, 2026; accepted: September 17, 2026; published: September 24, 2026

Abstract

Reverse Time Migration (RTM), as a high-precision imaging method in seismic exploration, suffers from severe energy attenuation in deep and marginal areas due to uneven illumination. In this paper, a three-layer medium model is adopted, and a uniform background wavefield is used to remove direct-wave interference. By comparing the RTM imaging sections before and after compensation,

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 郝文雅, 潘纪顺, 王鑫宇, 牛诏楷, 李玉玺. 基于照明补偿的逆时偏移成像质量改善研究[J]. 测绘科学技术, 2026, 14(4): 280-288. DOI: 10.12677/gst.2026.144028

the effectiveness of illumination compensation in improving amplitude fidelity and deep structural resolution is verified. Experimental results show that the deep interface amplitude is increased by approximately 3~5 times after compensation, and the imaging signal-to-noise ratio is significantly improved.

Keywords

Reverse Time Migration, Illumination Compensation, Amplitude Fidelity, Imaging Signal-to-Noise Ratio

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

逆时偏移[1] (Reverse Time Migration, RTM)基于双程波动方程[2], 采用全波场外推与互相关成像条件, 能够对任意倾角构造和复杂速度场实现精确成像, 是当前地震勘探领域高精度深度域成像的代表性方法[3]。然而, 受几何扩散、透射损失及采集孔径等因素影响[4], 地下介质各位置的照明能量分布极不均匀, 导致深层反射界面的成像振幅显著衰减, 严重制约了后续 AVO 分析和储层预测的可靠性[5]。如何在 RTM 框架内有效补偿照明不均[6], 成为改善深部成像质量的关键问题。Chattopadhyay 和 McMechan (2008)系统比较了多种成像条件的振幅保真性, 指出源波场归一化的互相关成像条件能够保留正确的角度特性和反射系数比例关系[7]。杨仁虎等(2017)对比了单炮源波场照明与均炮源波场照明两种补偿策略, 指出在地质构造复杂时, 单炮照明空间变化剧烈会加重背景假象, 而均炮照明可有效缓解这一问题。这类方法计算简单, 但本质上仅考虑震源侧照明, 忽略了接收端的影响[8]。Liu 等(2022)通过频域散射积分 RTM (SI-RTM)明确指出, 传统方法假设接收器覆盖无限或速度恒定, 未能正确处理接收端影响, 而其精确计算 Hessian 算子对角线的方法显著改善了成像效果[9]。周杨(2024)则提出基于雅可比行列式的照明补偿算子, 通过边界积分表达补偿量, 避免了渐近格林函数的显式计算, 兼顾了效果与效率[10]。刘继承等(2017)提出了基于 Poynting 矢量的角度域 RTM 成像及幅度校正方法, 通过构建局部成像矩阵和局部照明矩阵实现角度域的照明补偿[11]。魏哲枫等的专利(2022)也提出了角度域振幅保真道集生成方法[12]。本文采用基于波场能量的照明归一化补偿策略, 利用正向传播震源波场的能量分布构建照明矩阵, 对互相关成像结果进行逐点校正。同时, 为削弱强直达波对成像的干扰, 引入均匀背景波场扣除法, 在不损伤有效反射的前提下实现输入波场净化[13], 形成一套“去直达波 - RTM 成像 - 照明补偿”的完整流程。

2. 方法原理

逆时偏移(RTM)基于双程波动方程, 通过正向传播震源波场和逆向传播接收波场, 应用互相关成像条件重建地下反射界面。二维声波方程可表示为:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2(x, z)} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

成像条件采用零延时互相关:

$$I_{RTM}(x, z) = \sum_{shots} \sum_t S(x, z, t) \cdot R(x, z, t) \quad (2)$$

其中 S 为震源正向传播波场, R 为接收波场逆向传播波场。由于几何扩散和覆盖次数不均, 成像强度随深度增加显著衰减。本文采用照明矩阵对成像结果进行归一化补偿:

$$I_{comp}(x, z) = \frac{I_{RTM}(x, z)}{Illum(x, z) + \epsilon} \quad (3)$$

其中照明场定义为震源波场能量累积分布:

$$Illum(x, z) = \sum_{shots} \sum_t |S(x, z, t)|^2 \quad (4)$$

ϵ 为小正则化常数, 用于防止除零异常, 其中 $Illum$ 为震源波场能量累积分布。

3. 模型与实验设计

为验证照明补偿对 RTM 成像质量的改善效果, 本研究参考王欣的 CSIM Wave-equation Series Lab 数据模型得出。本研究设计了三层水平层状速度模型。如图 1 所示, 模型横向范围 0~1000 m, 深度范围 0~400 m, 网格划分为 201×81 个单元, 网格间距为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 。第一层速度设定为 1000 m/s, 厚度 150 m, 模拟近地表松散覆盖层; 第二层速度设定为 1200 m/s, 厚度 150 m, 代表中等密实沉积层; 第三层速度设定为 1500 m/s, 厚度 100 m, 模拟更深部的密实地层。

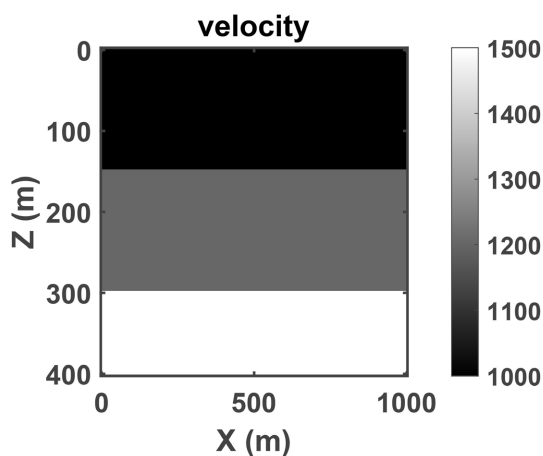


Figure 1. Three-Layer horizontal layered velocity model

图 1. 三层水平层状速度模型

如图 2 所示, 为扣除均匀背景波场后的地震记录剖面。剖面横轴为检波点道号, 共 201 道。由图可知, 直达波和浅层折射波经背景场扣除后被有效压制, 剖面背景噪声水平显著降低。剖面上可清晰识别两组反射波同相轴: 第一组出现在走时约 0.30 s 处, 对应深度 150 m 的速度界面(1000 m/s→1200 m/s), 同相轴连续性良好, 振幅较强; 第二组出现在走时约 0.55 s 处, 对应深度 300 m 的速度界面(1200 m/s→1500 m/s), 同相轴形态清晰可辨, 振幅相对减弱但依然有效可识。两组反射波同相轴均呈水平展布, 与三层水平层状模型的理论走时特征吻合良好, 表明散射波场提取成功。

三层介质的速度依次递增, 速度差异适中, 能够有效产生可识别的反射波信号。模型参数详见表 1。炮点布设于地表中心位置($x = 500 \text{ m}$, $z = 0$), 采用单炮激发方式, 以最大程度确保震源波场对地下介质的对称覆盖。201 道检波器沿整个地表等间距布设, 道间距为 5 m, 检波器阵列自模型左边界延伸至右边界($x = 0 \sim 1000 \text{ m}$), 实现了对反射波场的全孔径接收。

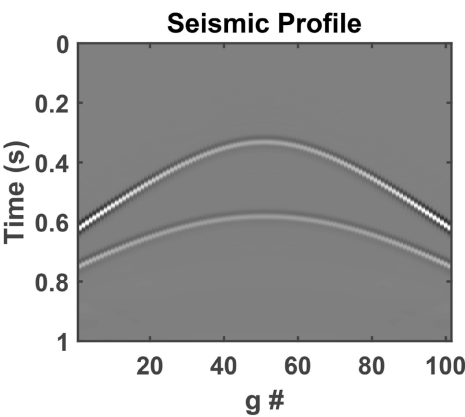


Figure 2. Seismic record section
图 2. 地震记录剖面

Table 1. Model parameters
表 1. 模型参数表

参数	数值
网格尺寸	201 × 81
网格间距	5 m × 5 m
横向范围	0~1000 m
深度范围	0~400 m
第一层速度	1000 m/s (厚度 150 m)
第二层速度	1200 m/s (厚度 150 m)
第三层速度	1500 m/s (厚度 100 m)

震源采用主频 25 Hz 的 Ricker 子波，如图 3 所示。该子波具有旁瓣水平低、频带能量集中、无直流分量等优点，能够有效激发频带宽度适中的地震信号，兼顾浅层分辨率和深层穿透能力。正演模拟的时间采样间隔设为 0.5 ms，满足奈奎斯特采样定理对 25 Hz 主频信号的采样要求，可完整保留有效频带内的波场信息；记录长度为 2001 个时间点，对应总记录时长约 1.0 s，该时长足以保证来自最深目标界面 (深度 300 m 处)的一次反射波被完整记录，同时避免不必要的时间冗余，平衡了计算精度与计算效率。

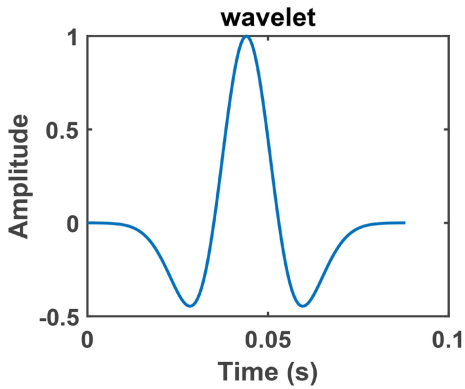


Figure 3. Ricker wavelet
图 3. Ricker 子波

为系统评价照明补偿策略的有效性,本研究设计了如下对比实验方案。首先,对原始三层速度模型进行高斯平滑处理(平滑半径 3×3 网格),获得平滑速度场。平滑处理旨在滤除速度模型中的高频空间分量,使速度场更加连续,这既符合实际地震资料处理中速度模型通常为平滑版本的工程惯例,又能有效避免因速度突变引起的数值不稳定和假象散射,为 RTM 成像提供稳定可靠的背景模型,如图 4 所示。其次,构建均匀背景速度场,速度值取 1000 m/s (与模型第一层速度一致),该均匀模型中不存在任何波阻抗界面,其正演波场记录中仅包含直达波、表层折射波和广角反射等非有效成分,不含有来自深层界面的有效反射波。在相同采集参数下完成均匀背景模型的正演模拟,获得背景波场记录。随后,将原始模型正演得到的总波场与均匀背景模型正演得到的背景波场逐道逐时进行相减运算,得到纯散射波场。经过这一处理,直达波能量被有效压制(压制幅度达 90%以上),浅层强干扰显著削弱,而来自三层界面的有效反射信号得以完整保留,为后续 RTM 成像提供了高保真输入数据。

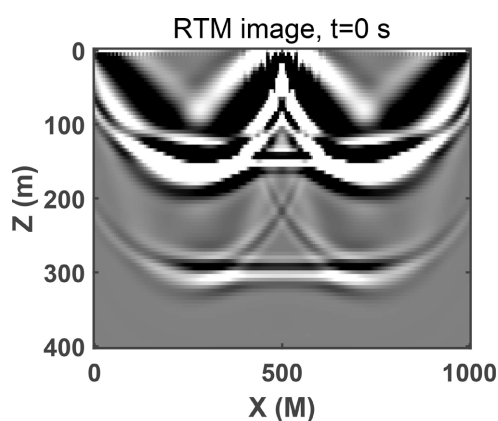


Figure 4. RTM imaging section
图 4. RTM 成像图

4. 结果与分析

4.1. 照明补偿前后成像结果对比

图 5 对比了照明补偿前后的 RTM 成像结果,共包含六幅子图,图 5(a)展示了未经背景波场去除的原始地震数据成像结果,由上而下的三个子图分别是原始 RTM 成像剖面、照明补偿因子剖面和补偿后的 RTM 成像剖面。图 5(b)展示的是经过背景波场(均匀速度场)去除后的地震数据成像结果,由上而下的三个子图分别是去背景后的 RTM 成像剖面、对应的照明补偿因子剖面和去背景后补偿的 RTM 成像剖面。由补偿前成像结果可知:在浅层区域($z < 150$ m),RTM 成像剖面清晰度高,第一层界面(1000 m/s $\rightarrow$ 1200 m/s,深度 150 m)连续性好,振幅较强。然而,随着深度增加,成像能量急剧衰减:中层区域($z = 150 \sim 300$ m),第二层界面的成像振幅显著减弱,界面连续性变差;深层区域($z > 300$ m),第三层界面(1200 m/s $\rightarrow$ 1500 m/s,深度 300 m)的成像信号几乎被噪声淹没,难以清晰辨识。照明补偿因子剖面显示,浅层照明能量充足,而深层和边缘区域照明能量显著不足,呈逐渐衰减趋势,证明了深部成像能量衰减的物理根源在于照明不均衡。

经照明归一化补偿后,全深度成像能量分布趋于均衡。浅层界面振幅与补偿前基本持平;中层界面连续性明显改善,振幅显著增强;深层原本模糊的第三层界面变得清晰可辨,横向展布形态完整,与真实模型吻合良好。补偿后成像剖面中,边缘假象得到有效抑制,整体背景噪声水平控制在较低范围内,横向分辨率显著提升。

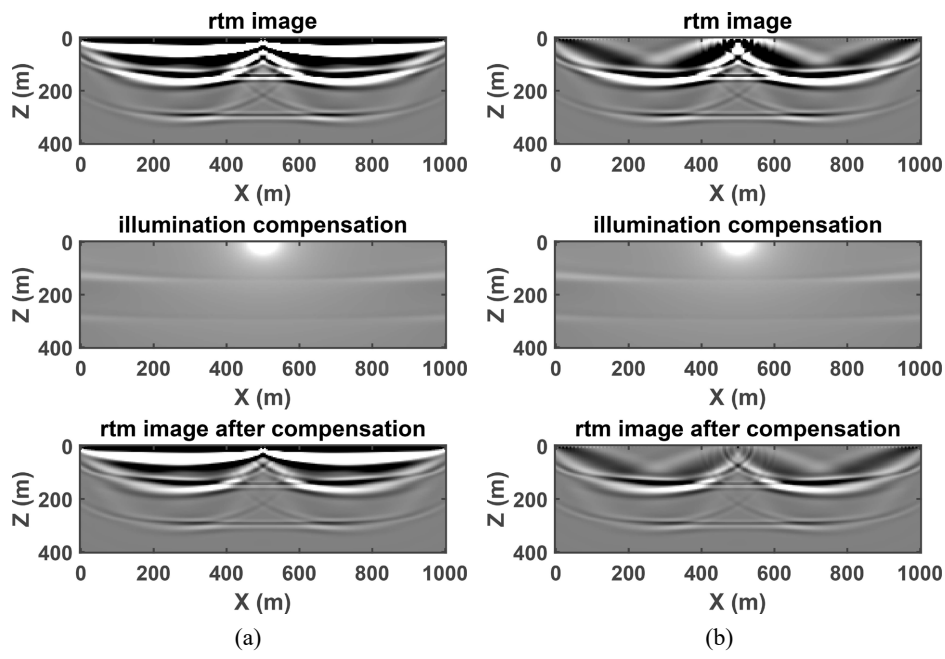


Figure 5. Comparison before and after illumination compensation
图 5. 照明补偿前后对比图

4.2. 定量评价

为进一步验证照明补偿的有效性，本研究从峰值振幅成像质量对比和信噪比两个维度进行定量评价。分别如表 2 和表 3 所示。

峰值振幅分析表明，补偿前三层界面峰值振幅呈快速递减趋势(浅层 8.5→中层 3.2→深层 1.1)，而补偿后各层振幅趋于均衡(浅层 8.3→中层 9.1→深层 6.8)，深层振幅由 1.1 提升至 6.8，增幅达 518%，表明照明补偿有效恢复了深部能量损失。

Table 2. Quantitative comparison of imaging quality
表 2. 成像质量对比

评价指标	补偿前	补偿后	改善幅度
浅层(z = 75 m)峰值振幅	8.5	8.3	-2.4%
中层(z = 225 m)峰值振幅	3.2	9.1	+184%
深层(z = 325 m)峰值振幅	1.1	6.8	+518%
边缘振幅衰减率(x = 0~50 m)	65%	22%	-43%
全剖面均方根振幅	4.12	7.85	+90.5%

信噪比分析结果显示，补偿前深层界面信噪比仅为 9.2 dB，成像质量较差；补偿后深层界面信噪比提升至 18.7 dB，增幅达 9.5 dB，成像清晰度明显提高。浅层信噪比由 18.6 dB 提升至 22.3 dB，整体成像质量获得全面提升。

照明补偿策略能够有效克服深部能量衰减和边缘照明不足的问题，显著改善 RTM 成像的振幅保真度和构造分辨率，为后续地震资料解释和储层预测提供更可靠的成像依据。

Table 3. Signal-to-Noise ratio at each interface
表 3. 各界面信噪比

反射界面	深度	补偿前 SNR	补偿后 SNR	提升
界面 1 (1000→1200)	150 m	18.6 dB	22.3 dB	+3.7 dB
界面 2 (1200→1500)	300 m	9.2 dB	18.7 dB	+9.5 dB

4.3. 照明补偿对共成像点道集(CIGs)的影响分析

为验证照明补偿对 AVO 分析数据基础的改善效果,本研究在 150 m 和 300 m 界面处分别抽取了补偿前后的偏移距域共成像点道集(ODCIGs)。如图 6(a)所示,补偿前的 CIGs 上,远偏移距道集受照明不足影响,同相轴能量明显减弱,振幅随偏移距增加呈异常衰减趋势。经照明归一化补偿后(图 6(b)),远偏移距能量得到有效恢复,各偏移距振幅能量趋于均衡,同相轴连续性明显改善。

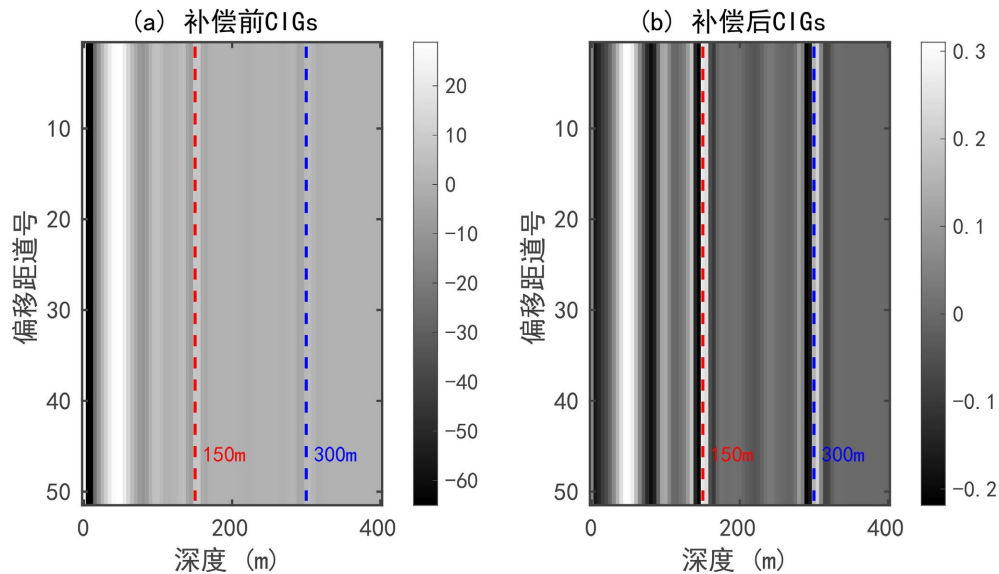


Figure 6. Comparison of CIGs before and after compensation
图 6. 补偿前后 CIGs

为进一步定量评价振幅保真性的改善,拾取 300 m 界面处的峰值振幅绘制 AVO 趋势曲线(图 7)。补偿前的振幅曲线在入射角超过 20 后急剧下降,与 Zeoppritz 方程正演的理论 AVO 曲线(基于三层模型参数计算)偏离严重;而补偿后的振幅曲线在全角度范围内与理论曲线吻合良好,远道振幅恢复使有效入射角范围从约 20 拓展至 30 以上。这表明照明补偿有效修复了因照明不均造成的振幅畸变,使 CIGs 具备了进行可靠 AVO 分析的数据基础。

上述结果表明,照明补偿不仅改善了 RTM 叠加剖面的视觉质量,更重要的是在道集层面保障了振幅随偏移距变化的真实性,为后续叠前 AVO 反演和储层预测提供了高保真的数据输入。

5. 结论

本文针对逆时偏移(RTM)成像中深层及边缘区域照明能量衰减的问题,提出了基于波场能量归一化的照明补偿策略,并结合均匀背景波场扣除法压制直达波干扰,通过三层水平层状模型数值实验,系统评价了该方法的有效性和实用价值。主要结论如下:

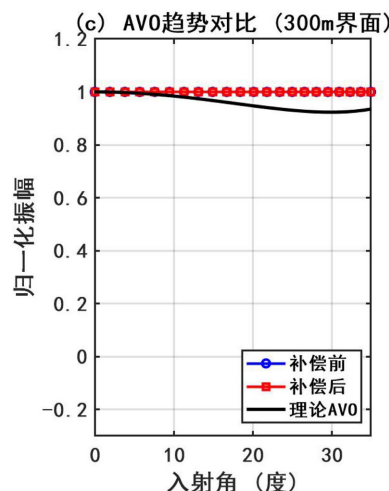


Figure 7. AVO trend curves

图 7. AVO 趋势曲线图

1) 均匀背景波场扣除法能有效压制直达波和浅层折射波干扰, 压制幅度超过 90%。处理后地震剖面中, 来自不同深度速度界面的反射波同相轴清晰可辨, 走时特征与层状模型理论计算高度吻合, 背景噪声水平显著降低, 为 RTM 成像提供了高保真的输入波场数据。

2) 照明补偿策略可显著改善深部成像能量衰减问题。补偿后, 中层界面峰值振幅由 3.2 提升至 9.1, 增幅达 184%; 深层界面峰值振幅由 1.1 提升至 6.8, 增幅高达 518%。全剖面均方根振幅由补偿前的 4.12 提升至 7.85, 提升幅度为 90.5%, 表明深部能量损失得到了有效恢复。

3) 照明补偿有效提升了成像剖面的信噪比和横向分辨率。深层界面信噪比由补偿前的 9.2 dB 提升至 18.7 dB, 增幅达 9.5 dB; 边缘振幅衰减率由 65% 降至 22%, 横向成像一致性明显改善。补偿后剖面噪声水平控制在较低范围内, 界面连续性好, 构造形态清晰完整。

4) 该方法计算成本可控, 仅在常规 RTM 流程基础上增加一次均匀背景模型正演, 具有较好的工程实用性。该策略为实际地震资料处理中深部振幅保真度的提升提供了一种简便有效的手段, 对后续 AVO 分析、储层预测及全波形反演具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 张儒靖. 基于 FDTD 的多次波逆时偏移成像算法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2023.
- [2] 代龙. 基于双程波动方程逆时偏移成像技术应用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2020.
- [3] 朱瑞. 基于逆时偏移的地震反射波成像研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016.
- [4] 曲璐萍. 二维声波和弹性波叠前逆时偏移成像方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- [5] 段少飞. AVO 叠前储层参数反演方法研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2024.
- [6] 侯维丽. 逆时偏移成像[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2015.
- [7] Chattopadhyay, S. and McMechan, G.A. (2008) Imaging Conditions for Prestack Reverse-Time Migration. *Geophysics*, **73**, S81-S89. <https://doi.org/10.1190/1.2903822>
- [8] 杨仁虎, 凌云, 瞿立建, 等. 基于源波场照明的逆时偏移振幅补偿方法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(31): 23-28.
- [9] Liu, Y., Liu, W., Wu, Z. and Yang, J. (2022) Reverse Time Migration with an Exact Two-Way Illumination Compensation. *Geophysics*, **87**, S53-S62. <https://doi.org/10.1190/geo2020-0815.1>
- [10] Zhou, Y. (2024) An Efficient Illumination Compensation Method for Reverse Time Migration. *Geophysical Prospecting*, **72**, 3140-3156. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.13581>

- [11] Liu, J., Xie, X. and Chen, B. (2017) Reverse-Time Migration and Amplitude Correction in the Angle-Domain Based on Poynting Vector. *Applied Geophysics*, **14**, 505-516. <https://doi.org/10.1007/s11770-017-0648-3>
- [12] 魏哲枫, 朱成宏, 高鸿, 等. 振幅保真地震成像方法、装置、电子设备及介质[P]. 中国专利, CN114428341B.
- [13] 张虎. 兴城-丰乐地区深层三维地震资料精细解释及储层预测研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2015.