

文章编号: 1004—5589 (2025) 01—0119—12

王聪, 栗学磊, 岳玉波, 等. 起伏地表低信噪比相干性约束高斯束偏移[J]. 世界地质, 2025, 44 (1): 119–130. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.01.009.

WANG C, LI X L, YUE Y B, et al. Coherence constrained Gaussian beam migration for low signal-to-noise ratio data in irregular topography [J]. World Geology, 2025, 44 (1): 119–130. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.01.009.

## 起伏地表低信噪比相干性约束高斯束偏移

王聪<sup>1</sup>, 栗学磊<sup>2\*</sup>, 岳玉波<sup>3</sup>, 郑江龙<sup>2</sup>, 陈明春<sup>1</sup>, 罗章清<sup>1</sup>

1. 中石化石油工程地球物理有限公司南方分公司, 成都 610213;
2. 中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055;
3. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

**摘要:** 本文以研究复杂山地低信噪比地震数据成像优化为目的, 依据噪音与有效反射信号在相干性上存在的明显差异, 创建了有效的相干性约束噪音压制方法, 为山地成像实际应用提供理论与技术支持。针对起伏地表低信噪比地震数据面临的常规成像困难, 提出起伏地表相干性约束高斯束偏移方法。利用高程时移修正消除了起伏导致的射线束分解不准确, 并设计了束中心点与检波点的水平投影等效离散间隔方法, 有效解决了起伏地表偏移存在的成像幅值不均衡弊端。在相干性约束方面, 提出了新型稳定的复数域加权相干谱统计方法, 并设计了有效反射信号的阈值提取和指数强化方法, 实现了随机噪音与非相干性假成像的有效压制。利用2项合成数据与2项实测数据数值试验验证了该方法在噪音与假成像压制方面的有效性。起伏地表合成数据利用水平投影等效离散间隔方法实现了幅值均衡与划弧假成像压制; 实测数据相干谱统计验证了加权相干谱比常规相干谱明显平滑稳定; 层状模型合成数据利用相干谱阈值设置压制了大部分划弧假成像; 实测山地数据证明了新提出的相干性约束方法对随机噪音的明显压制效果。新创建的相干性约束偏移成像方法在成像过程中有效压制了不具有相干性特征的噪音与假成像, 明显提升了成像效果。

**关键词:** 低信噪比; 相干谱; 高斯束偏移; 起伏地表

中图分类号: P631.4 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.01.009

## Coherence constraint Gaussian beam migration for low signal-to-noise ratio data in irregular topography

WANG Cong<sup>1</sup>, LI Xuelei<sup>2\*</sup>, YUE Yubo<sup>3</sup>, ZHENG Jianglong<sup>2</sup>, CHEN Mingchun<sup>1</sup>, LUO Zhangqing<sup>1</sup>

1. Sinopec Geophysical Corporation Southern Branch, Chengdu 610213, China;
2. Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, Guangdong, China;
3. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

收稿日期/Received: 2024-10-09; 修订日期/Revised: 2024-11-19; 出版日期/Published: 2025-02-25

基金项目: 福建省海洋物理与地质过程重点实验室开放基金课题 (KLMPG-22-04); 南方海洋科学与工程广东省实验室 (珠海) 项目 (SML2021SP318); 深圳市基础研究面上项目 (JCYJ20210324102007021)

第一作者: 王聪 (1985—), 男, 高级工程师, 主要从事地震资料处理与研究。E-mail: xn-wangc.osgc@sinopec.com

\* 通信作者: 栗学磊 (1988—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 从事地震数据成像与反演, 高性能计算等方面的研究。

E-mail: xl.li@siat.ac.cn

© Editorial Office of World Geology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

**Abstract:** To study imaging optimizing algorithms for low signal-noise rate (SNR) seismic data in irregular topography, an effective coherence constraint noise suppression method is established according to the obvious difference in coherence characteristics between noise and effective reflected signals, which can provide theoretical and technical support for practical applications of the imaging in irregular topography. In order to solve the problem of conventional imaging of low signal-to-noise ratio seismic data in irregular topography, a coherence constraint Gaussian beam migration method for irregular topography is proposed in this paper. The elevational correction of time-shift eliminates the inaccuracy of beam decomposition caused by irregular topography. Horizontal projection equivalent discrete interval (HPEDI) for beam center and receiver location is designed to solve the drawback of unbalance of imaging amplitude. About the coherence constraint, a new stable complex domain weighted coherence spectrum computing method is proposed, and the threshold extraction and exponential strengthening methods for effective reflection signal are designed to achieve the effective suppression of random noise and incoherent false imaging. Numerical experiments of 2 synthetic data examples and 2 measured data examples are applied to validate the effectiveness of the proposed methods in noise and false image suppression. The proposed HPEDI method can achieve significant image optimization in amplitude equalization and arc false image suppression for the synthesized data in irregular topography. The coherence spectrum of real measured data verifies that the weighted coherence spectrum is smoother and more stable than the conventional coherence spectrum. Most of the arc false images of the synthesized data in a layered model are suppressed by using the threshold of coherence spectrum. The irregular real measured low signal-to-noise ratio data prove that the proposed coherence constraint method suppresses random noise obviously. The proposed coherence constraint migration imaging method can effectively suppress the noise and false imaging without coherence characteristics in the imaging process, and can significantly improve the imaging effect.

**Keywords:** low signal-to-noise ratio; coherence spectrum; Gaussian beam migration; irregular topography

## 0 引言

中国油气地震勘探面临大量山地勘探环境, 山地复杂的地质、地表条件导致采集地震数据的信噪比极低, 传统的偏移成像方法难以进行有效成像, 严重影响了地震解释和储层预测的精度。山地情况下近地表速度的横向变化以及起伏的地表面对地震数据的采集和处理造成了很大的困难。常规处理中的高程静校正不适用于地表起伏严重与近地表速度横向变化剧烈的情况, 明显影响随后的偏移成像质量。同时, 陆地近地表的介质疏松特征导致采集到的地震数据信噪比极低, 而常规偏移方法理论仅考虑理想情况下的数据成像, 对严重的噪音干扰缺少消除或压制能力, 难以取得有效的成像结果。因此, 如何解决面向低信噪比山地资料成像问题, 是中国当前油气勘探面临的重要挑战。

地震数据中的有效反射信号具有典型的相干性或稀疏性特征, 而低信噪比数据中的随机噪音不具有该特征。相干性是有效反射信号与多种噪音之间的重要差异, 当前已有多种基于相干性的方法获得

发展以实现噪音压制与成像优化。Stoffa 等<sup>[1]</sup>设计了  $\tau-p$  域地震数据相干性统计方法, 并利用阈值设置进行窗口滤波, 以压制平面波分解存在的数据混叠噪音。Hu 等<sup>[2]</sup>将该方法推广到低覆盖次数地震数据高斯束偏移成像, 依据相干谱统计信息来控制菲涅尔区成像范围, 用来压制低叠加次数导致的成像脚印。Yang 等<sup>[3]</sup>和吕考考等<sup>[4]</sup>将相干谱统计扩展到复数域以提高相干性计算的稳定性, 同时统计共炮点和共检波点道集的相干谱, 控制炮点与束中心点菲涅尔区范围, 进一步改进了低覆盖次数地震数据成像脚印压制效果。黄建平<sup>[5]</sup>也提出了  $\tau-p$  域阈值设置压缩数据与成像噪音方法。吴建文等<sup>[6]</sup>利用相干性来缓解射线束远距离扩散严重等问题。除了相干性方法外, Sun 等<sup>[7-8]</sup>发展了基于稀疏性的压缩感知 Kirchhoff 射线束偏移方法, 有效压制了数据截断响应, 提高了  $\tau-p$  域射线束分解的收敛性。然而, 以上方法主要针对地震数据不足情况下的噪音压制, 而针对山地数据低信噪比情况下的成像优化的相关研究较少。

高斯束偏移方法具有计算高效, 陡倾界面成像

等多项明显的优点,在最近二十多年得到了快速发展和广泛应用。高斯束偏移拥有 Kirchhoff 偏移优点的同时,解决了传统 Kirchhoff 偏移多路径和多走时问题,具有较高的计算精度。Hill<sup>[9-10]</sup>提出了叠后和叠前高斯束偏移。此后,Gray<sup>[11]</sup>将高斯束偏移推广到共炮域。Alkhalifah<sup>[12]</sup>和Zhu等<sup>[13]</sup>发展了各向异性高斯束偏移。Gray等<sup>[14]</sup>分别推导了高斯束幅偏偏移。岳玉波<sup>[15]</sup>和段鹏飞等<sup>[16]</sup>分别实现了各向同性和各向异性角度域共成像点道集高斯束偏移。Li等<sup>[17]</sup>和栗学磊等<sup>[18]</sup>发展了3D多波多分量弹性高斯束偏移,并在偏移过程中实现了精确的波型分离。之后,高斯束在最小二乘偏移方面的研究与应用也获得了发展,取得了明显的成像优化效果<sup>[19-22]</sup>。在此基础上,基于高斯束的多种改进优化技术获得了发展,以适应实际应用需求,如海底四分量<sup>[23]</sup>、衰减补偿<sup>[24]</sup>、稀疏数据<sup>[25]</sup>等。高斯束偏移常包含 $\tau$ - $p$ 域局部射线束分解,可为反射信号相干性特征的应用提供便利。

笔者针对山地低信噪比地震数据面临的成像困难问题,利用有效反射信号的相干性特征,发展一套相干性约束高斯束偏移方法。对于起伏地表情况,本文设计了时移误差修正以消除高程起伏导致的射线束分解不准确问题,并提出水平投影等效离散间隔方法来解决起伏地表偏移存在的成像幅值不均衡问题。对于低信噪比噪音压制问题,笔者提出了相干性约束成像优化方法,通过设计新型的复数域加权相干谱统计方法,提高相干谱计算的稳定性,并在此基础上设计了有效反射信号的阈值提取和指数强化方法,实现了随机噪音与非相干性假成像的有效压制。通过合成数据与实测数据验证了新建方法在噪音压制与成像优化方面的有效性。

## 1 起伏地表高斯束偏移

该部分在已有的2D常规高斯束偏移成像的基础上,发展适用于起伏地表的高斯束偏移方法。针对起伏地表射线束分解存在的时移误差明显和离散不均衡问题,设计优化解决方法,实现有效的起伏地表偏移成像。

### 1.1 高斯束偏移

Červený等<sup>[26-27]</sup>推导了2D声波和弹性非均匀各向同性介质中的高斯束表达式,在此给出声波介

质高斯束归一化表示形式:

$$u_{\text{GB}}(\mathbf{x}; \mathbf{r}, \mathbf{p}; \omega) = \sqrt{\frac{\mathbf{v}(s)q(s_0)}{\mathbf{v}(s_0)q(s)}} \cdot \exp\left\{i\omega\left[\tau(s) + \frac{1}{2} \frac{\mathbf{p}(s)}{q(s)} n^2\right]\right\} \quad (1)$$

式中: $u_{\text{GB}}$ 为 $\mathbf{x}$ 点高斯束波场; $\mathbf{r} = (r_x, r_z)$ 为高斯束入射坐标; $\mathbf{x} = (x, z)$ 为2D空间坐标; $\omega$ 为圆频率; $\mathbf{v}$ 是波场波速; $\mathbf{p} = (p_x, p_z)$ 是高斯束初始慢度矢量,并且满足 $p_z = (\mathbf{v}^{-2} - p_x^2)^{\frac{1}{2}}$ ; $(s, n)$ 为二维中心射线坐标系; $p$ 和 $q$ 是高斯束动力学参数,详细解释见文献[26, 28]。

二维高斯束偏移成像可利用互相关成像条件实现,在此我们提供最终成像表达式,频率域表示形式如下:

$$I(\mathbf{x}) = C\Delta L \sum_L \int d\omega \iint \frac{dp_{sx} dp_{rx}}{p_{sz}} u_{\text{GB}}(\mathbf{x}; \mathbf{s}, \mathbf{p}_s; \omega) u_{\text{GB}}(\mathbf{x}; \mathbf{L}, \mathbf{p}_r; \omega) D(\mathbf{L}, \mathbf{p}_r, \omega) \quad (2)$$

式中: $I$ 为互相关成像; $C$ 为常数; $\mathbf{s}$ 为震源点坐标; $\mathbf{L}$ 为束中心点坐标; $\Delta L$ 为束中心点水平间隔,一般也为常数; $\mathbf{p}_s = (p_{sx}, p_{sz})$ 和 $\mathbf{p}_r = (p_{rx}, p_{rz})$ 分别为震源端和束中心端的射线入射慢度矢量。 $D$ 为地震数据高斯窗口分解后的局部平面波,本文称为射线束分解,具体表达式如下:

$$D(\mathbf{L}, \mathbf{p}_r, \omega) \approx \left| \frac{\omega}{\omega_l} \right|^3 \int ds^r u(\mathbf{r}, \omega) \cdot \exp[i\omega \mathbf{p}_r \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{L})] \cdot \exp\left[-\left| \frac{\omega}{\omega_l} \right| \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{L}|^2}{2w_l^2}\right] \quad (3)$$

式中: $\mathbf{r}$ 为检波点坐标; $ds^r$ 为检波点积分微元; $u$ 为原始地震数据; $\omega_l$ 为高斯束参考频率; $w_l$ 为高斯束参考初始有效半宽度。在实际应用中,高斯束偏移具体执行比较复杂,在此不进行详细讨论。

在常规高斯束偏移中,假设检波点位于水平地表上,束中心点也分布在水平线上。这种假设对复杂的射线束方法进行了简化,然而这不符合起伏地表情况。如果将常规高斯束偏移用于起伏地表成像,将存在2个明显问题:①射线束倾斜叠加过程中的时移误差明显;②束中心点与检波点离散间隔受高程影响明显。针对这2个问题,分别设计改进优化

方案, 实现适用于起伏地表情况的高斯束偏移。

### 1.2 起伏地表高程时移修正

射线束分解是通过高斯窗口内的倾斜叠加(或 $\tau-p$ 变换)来完成的。与水平地表不同, 起伏地表存在的高程差异将导致常规的倾斜叠加时移误差明显。岳玉波等<sup>[29]</sup>对该问题已有研究, 本文仅对其进行简单说明。针对这一问题, 将高程导致的时移误差考虑进来, 对常规时移进行修正(图1)。式(3)中的时移项在起伏地表情况下可表示为:

$$p_r \cdot (r - L) = p_{rx}(r_x - L_x) + p_{rz}(r_z - L_z) \quad (4)$$

式中:  $h = -(r_z - L_z)$  为检波点对束中心点的相对高程;  $p_{rz} = (v_L^{-2} - p_{rx}^2)^{\frac{1}{2}}$  为慢度 $z$ 分量。常规倾斜叠加与 $p_{rz}$ 无关, 但是起伏地表倾斜叠加与 $p_{rz}$ 相关。

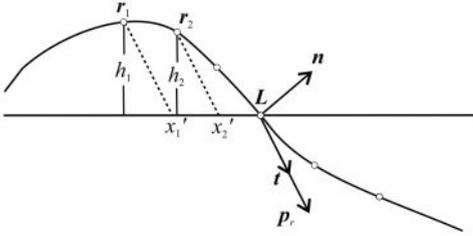


图1 起伏地表时移高程修正与离散间隔投影

Fig. 1 Shifted time modification for irregular surface and discrete interval projection

### 1.3 起伏地表离散均衡校正

除了时移误差以外, 起伏地表高斯束偏移还存在束中心点和检波点离散间隔不均匀问题。事实上, 等效的离散间隔不仅和地表倾斜方向有关, 还与入射慢度方向有关。

针对该问题, 本文设计了有效的离散间隔校正方案。将束中心点和检波点均投影到水平面上, 计算不同入射慢度方向情况下的等效间隔(图1)。水平面假设符合常规高斯束偏移方法, 且在局部范围内可精确计算局部平面波的投影信息。

$$t_x = \frac{p_{rx}}{|p_r|}, t_z = \frac{p_{rz}}{|p_r|} \quad (5)$$

$$h_1 = L_z - r_{1z}, h_2 = L_z - r_{2z} \quad (6)$$

式中:  $t = (t_x, t_z)$  为入射方向单位矢量;  $h_1$  和  $h_2$  分别为检波点  $r_1$  和  $r_2$  对束中心点  $L$  的相对高程;  $r_1$  和  $r_2$  对沿入射方向在水平面上的投影点可表示为:

$$x'_1 = r_{1x} + \frac{t_x}{t_z} h_1, x'_2 = r_{2x} + \frac{t_x}{t_z} h_2 \quad (7)$$

$r_1$  和  $r_2$  之间的等效间隔可以表示为:

$$\Delta s^r = x'_2 - x'_1 = (r_{2x} - r_{1x}) + \frac{t_x}{t_z} (h_2 - h_1) \quad (8)$$

在水平地表情况下,  $h_2 = h_1 = 0$ , 式(8)退化为与入射方向无关的常规离散间隔。利用校正后的检波点离散间隔代替原始的离散间隔, 可压制检波点起伏不平衡问题。

同样, 针对束中心起伏分布导致的不平衡问题, 可以计算投影后的束中心间隔。由于常规的束中心水平间隔为常数  $\Delta L$ , 并且束中心间隔远高于检波点间隔, 通过统计高斯窗口范围内的加权平均倾斜方向矢量  $n = (n_x, n_z)$  来等效表述束中心投影间隔为:

$$\Delta L_{\text{mod}} = \left(1 + \frac{t_x n_x}{t_z n_z}\right) \Delta L \quad (9)$$

式中:  $\Delta L_{\text{mod}}$  为投影校正后的束中心离散间隔。在水平地表情况下,  $n_x = 0$ , 式(9)退化为与入射方向无关的常规离散间隔  $\Delta L$ 。利用校正后的束中心离散间隔  $\Delta L_{\text{mod}}$  代替常规离散间隔  $\Delta L$ , 可压制束中心起伏导致的不平衡问题。

完成基于水平投影的离散间隔校正, 即可实现幅值均衡的起伏地表高斯束偏移成像。以起伏地表层状模型为例, 来简单验证该离散间隔校正方法的有效性。图2显示了层状模型的速度分布, 模型地表起伏严重。图3显示了单炮地震记录, 检波点沿起伏地表排布, 水平间隔 10 m, 单炮震源位于  $x =$

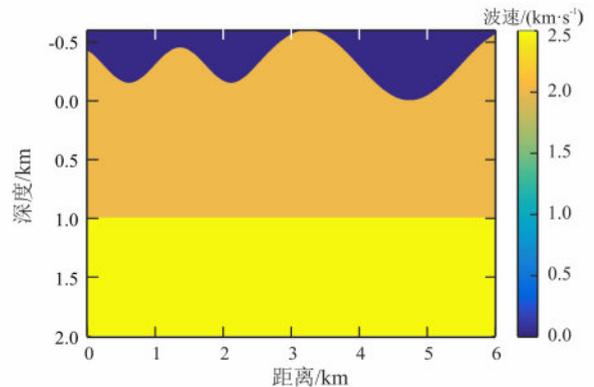


图2 起伏地表层状模型

Fig. 2 Irregular layered model

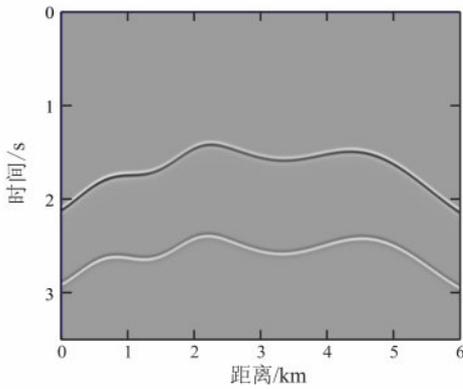
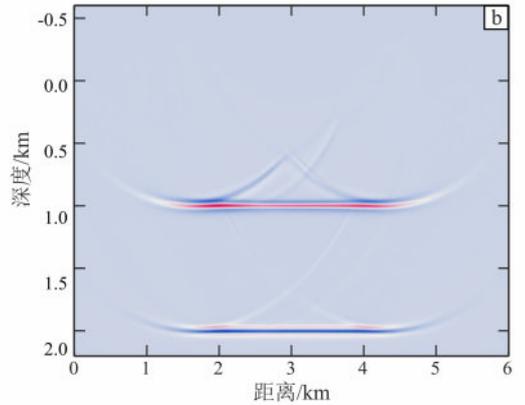
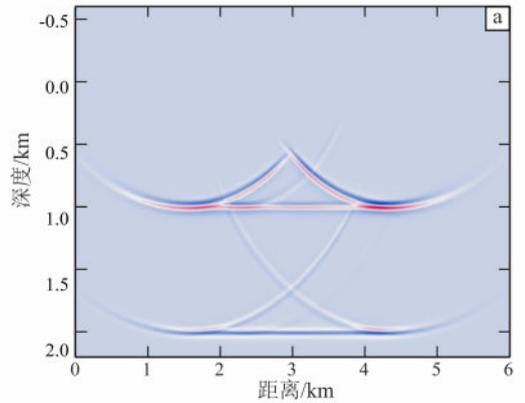


图 3 起伏地表面层状模型单炮记录

Fig. 3 Single shot record in irregular layered model

3 km 的地表面上。震源子波为雷克子波, 子波主频 15 Hz。有效反射信号有 2 层, 弯曲分布严重, 与常规水平地表模型反射信号同相轴有明显的差异。

图 4 显示了起伏地表面层状模型高斯束偏移成像, 2 个成像均使用了高程时移修正后的高斯束偏移方法, 均获得了合理的走时成像信息。2 个成像的区别在于使用的束中心与检波点离散间隔不同。图 4a 使用常规的离散间隔, 即常数。而图 4b 使用本文建立的水平投影等效离散间隔, 该间隔随射线束入射方向的改变而改变。2 个成像差别主要有: ①在有效反射界面位置, 图 4b 成像幅值分布比图 4a 更均衡; ②数据截断导致的划弧假成像, 图 4b 假成像比图 4a 明显微弱。这是因为在起伏地表明显倾斜入射情况下, 常规的离散间隔算法容易导致假成像幅值过强, 而有效成像幅值过弱。而本文提出的水平投影等效离散间隔法能够消除这种幅值严重不均衡问题, 使其幅值分布类似水平地表模型成像的幅值分布。由此可验证等效离散间隔方法的有效性。



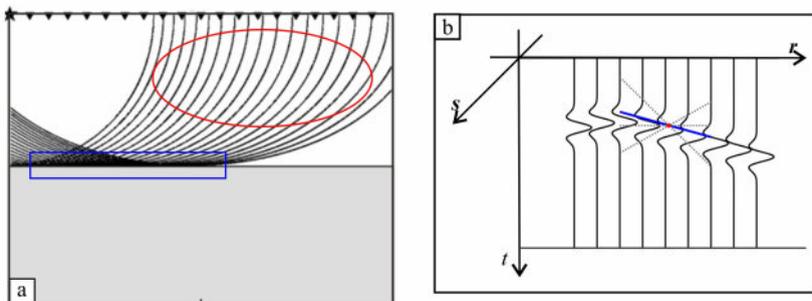
a. 使用常规离散间隔; b. 使用本文的水平投影等效离散间隔。

图 4 起伏地表面层状模型偏移成像

Fig. 4 Migration for irregular layered model

## 2 相干性约束偏移成像

除了起伏地表问题以外, 山地地震数据还存在信噪比低的问题。针对这个问题, 本文发展了相干性约束高斯束偏移成像方法。相干性约束偏移成像的基本理论如图 5 所示, 在成像过程中有些成像区



a. 有效与无效成像区; b. 地震数据相干性特征。

图 5 相干性约束成像示意图

Fig. 5 Coherence constraint imaging diagram

是有效成像区,而相当一部分区域是无效成像区(图5a),且有效成像区必然对应地震数据中的相干性同相轴的有效反射信号(图5b)。基于该特征分析,本文通过统计地震数据的相干性特征,来提取和强化有效反射信号,限制有效成像范围,压制随机噪声、假频、脚印、假成像等成像噪声,优化成像效果。

## 2.1 相干谱统计计算

本文通过  $\tau-p$  域相干谱计算来统计地震数据的相干性特征。有关相干谱计算已有多种类型,如窗口互相关统计<sup>[30]</sup>,实数/复数域相似性统计<sup>[1-4]</sup>等。然而,已有相干谱统计方法还存在一个问题,即所有采样点无论远近对相干谱计算的影响是相同的,这不符合  $\tau-p$  域高斯窗倾斜叠加特征,因为不同位置倾斜叠加权重不同。针对这个问题,本文设计了考虑采样点影响权重的相干谱统计方法,具体公式为:

$$F_{\text{coh}}(x_i) = \frac{\left| \sum w_i x_i \right|^2}{\sum w_i \sum w_i |x_i|^2} \quad (10)$$

式中:  $F_{\text{coh}}$  为相干谱;  $x_i$  为采样复数幅值,是指倾斜叠加过程中在各个地震道提取的复数幅值;  $w_i$  为对应权重值,本文默认使用高斯衰减函数设置权重值。下标  $i$  表示采样点编号。另外,为提高计算的稳定性,常在时间窗口内进行多次采样,即

$$F_{\text{coh}}(x_i) = \frac{\sum_j \left| \sum w_i x_i \right|^2}{\sum_j \left( \sum w_i \sum w_i |x_i|^2 \right)} \quad (11)$$

式中:下标  $j$  表示时间轴方向上的采样点编号。时间轴上的多次采样可明显增加采样点数量,提高相干谱统计的稳定性,然而这也相当于沿时间轴平滑计算,容易导致相干谱分辨率降低<sup>[1]</sup>。因此时间轴采样不宜过多,本文设计方法一般控制时间轴采样数量在 1~5 范围内。另外,为增强公式表达的可解释性,式(11)可等价表示为:

$$F_{\text{coh}}(x_i) = \frac{\sum_j |\bar{x}|^2 \sum_i w_i}{\sum_j \sum_i w_i |x_i|^2} \quad (12)$$

式中:  $\bar{x}$  为采样点加权平均值。

$$\bar{x} = \frac{\sum_i w_i x_i}{\sum_i w_i} \quad (13)$$

由式(12)可以看出,相干谱计算的分子是样本平均值的模的平方,分母是样本模的平方的平均值,因此相干谱幅值恒满足  $[0,1]$  区间分布的特征。相干谱与采样点原始幅值分布无关,仅分布在固定的实数区间内。当采样点幅值完全相同的情况下,相干谱幅值达到最高值 1,而当采样点加权平均值为 0 时,相干谱幅值达到最低值 0。

为验证本文提出的加权相干谱的稳定性,对实测地震数据的相干谱统计效果进行对比。图6是某区实测地震记录部分截图,使用不同方法从中统计相干谱。本次试验时间轴方向采样数量为 1。图7相干谱统计效果显示,本文提供的加权相干谱比常规相干谱计算方法更稳定,且相干性能量聚合更优。而常规的复数域相干谱<sup>[3-4]</sup>受远距离相干信息影响严重,导致统计不稳定,能量分布偏分散。由此可验证本文提出的加权相干统计的有效性。

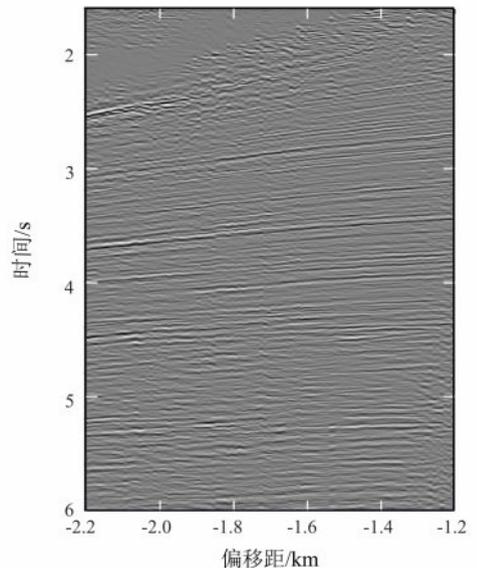
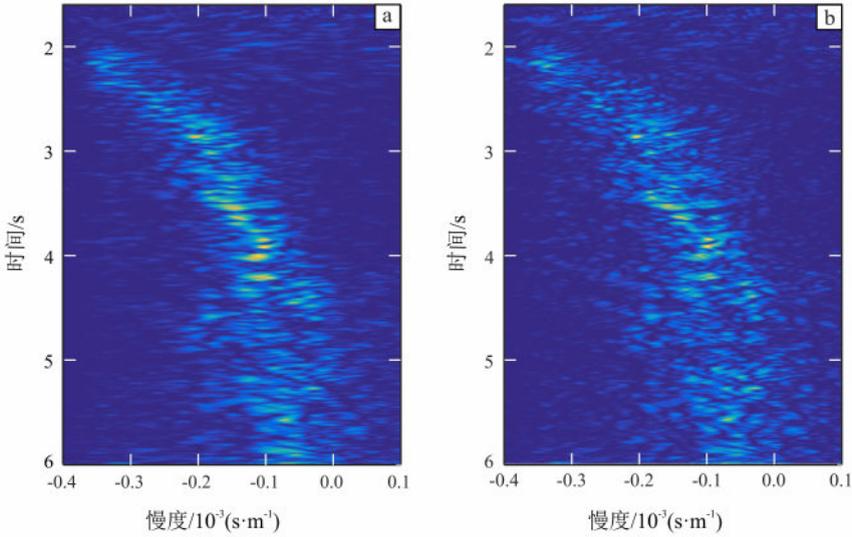


图6 实测数据地震记录

Fig. 6 Seismic record of measured data

## 2.2 有效信号提取与强化

在相干谱统计的基础上进行有效反射信号提取与强化。本文设计 2 种方法:阈值提取与指数强化。



a. 本文的复数域加权相干谱; b. 常规复数域相干谱。

图 7 实测数据  $\tau-p$  域相干谱

Fig. 7  $\tau-p$  domain coherence spectrum of measured data

阈值提取方法通过设置阈值  $V_{Th}$  来提取有效反射信号。当相干谱满足  $F_{coh} > V_{Th}$  时, 对应的  $\tau-p$  域射线束信息为有效反射信号, 否则无效清除。阈值一般设置范围为  $V_{Th} \in [0.0, 0.3]$ 。提取函数可表示为

$$P(L, p, \tau) = \begin{cases} 1, & F_{coh} > V_{Th} \\ 0, & F_{coh} \leq V_{Th} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $P$  为有效反射信号提取函数。

指数强化是利用相干谱  $[0, 1]$  区间分布特征, 通过相干谱指数计算来强化有效反射信号, 压制无效信号。优化后的射线束信息可表示为

$$D_{opt}(L, p, \tau) = D(L, p, \tau) \cdot P(L, p, \tau) \cdot F_{coh}^\alpha(L, p, \tau) \quad (15)$$

式中:  $\alpha \in [0, 3]$  为相干谱指数;  $D_{opt}$  为优化后的  $\tau-p$  域射线束数据。2 种优化方法通过参数设置可以同时使用, 也可以单独使用。

我们以实测地震数据来验证有效反射信号提取的有效性。图 8a 是图 6 实测数据的  $\tau-p$  域射线束信息数据, 依据图 7a 相干谱数据和阈值 0.05, 提取出有效的反射信号。图 8b 显示了有效反射信号

提取效果, 大部分弱相干性的随机噪音被压制掉, 保留下来的是局部范围内的具有明显能量汇聚的有效反射信号。

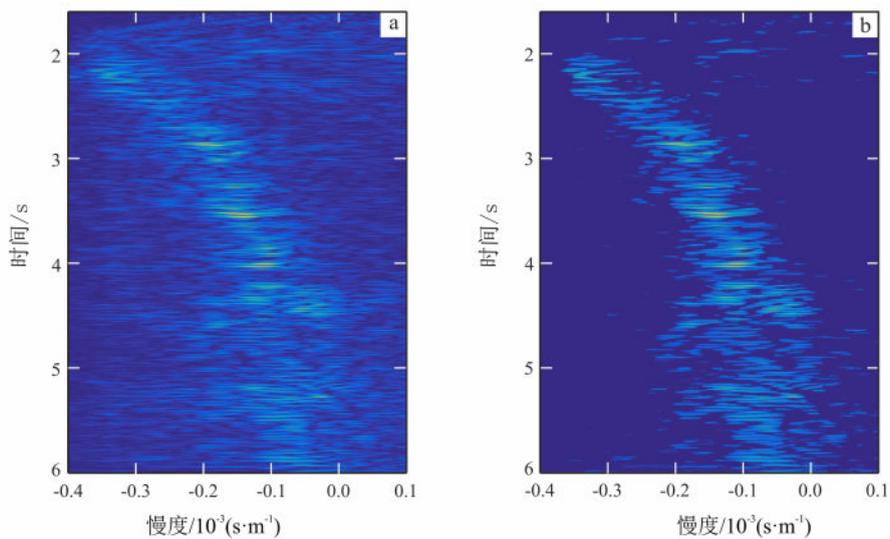
### 3 数值试验

笔者利用简单层状模型和实测数据来验证本文所提供的起伏地表相干性约束高斯束偏移方法的有效性。

#### 3.1 层状模型

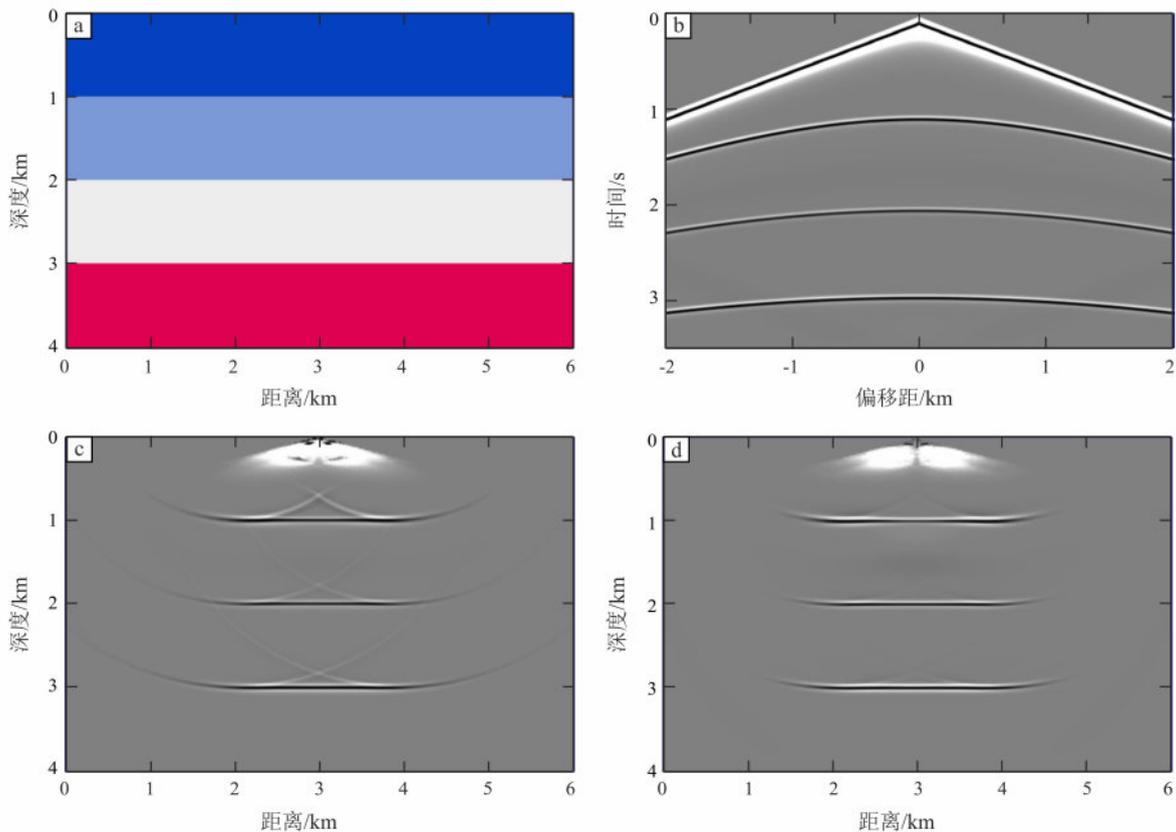
以简单层状模型合成地震记录为例, 来验证相干性约束高斯束偏移在非相干性假成像噪音压制方面的有效性。图 9a 显示了该层状模型, 共有 3 个反射界面。图 9b 为有限差分方法合成单炮地震记录, 检波点间隔 10 m, 最大偏移距 2 km, 震源位于  $x = 3$  km。震源子波为雷克子波, 子波主频 15 Hz。

图 9c 显示了常规的高斯束偏移成像效果, 由于数据边界截断导致的划弧假成像比较明显。划弧假成像存在于无效成像区。依照相干性约束理论, 该假成像区域对应的地震数据相干性较弱, 可通过相干性约束进行有效压制。图 9d 显示了本文提供的相干性约束高斯束偏移成像效果, 阈值设置为 0.2。绝大部分划弧假成像获得了明显压制。由此验证了相干性约束方法对非相干性数据导致的假成



a. 原始射线束; b. 阈值提取的射线束。

图8 实测数据  $\tau-p$  域射线束分解  
Fig. 8  $\tau-p$  domain beam decomposition of measured data



a. 层状模型; b. 层状模型单炮地震记录; c. 常规高斯束偏移成像; d. 相干性约束高斯束偏移成像。

图9 层状模型相干性约束偏移成像  
Fig. 9 Coherence constraint migration of layered model

像噪音具有显著的噪音压制效果。在这种情况下, 即使数据震源稀疏或数据覆盖次数过低, 由此导致的划弧假成像也能有效压制, 这与 Yang 等<sup>[3]</sup>和吕考考等<sup>[4]</sup>去噪效果相似。另外, 指数设置为 2 的情况下也能达到与图 9d 相似的优化效果。除了划弧假成像, 相干性约束对假频、脚印、多震源串扰等假成像噪音均具有显著的压制效果。

### 3.2 实测数据

以起伏地表低信噪比实测数据为例, 对本文提供的起伏地表相干性约束高斯束偏移在低信噪比噪

音压制方面的有效性进行验证。图 10 显示了起伏地表观测系统的高程分布, 高程分布在 0.5 ~ 1.2 km 范围内。图 11 显示了观测系统震源与检波点排布, 其中对角红线代表零偏移距位置。大部分情况偏移距分布在 -7 ~ 7 km 范围内, 一般检波点间隔约 40 m, 震源分布参差不齐, 且存在大量震源缺失情况。图 6 是该实测数据中信噪比较高的单炮记录部分截图。该数据的低信噪比、起伏地表、数据缺失等多种问题导致实际成像比较困难。

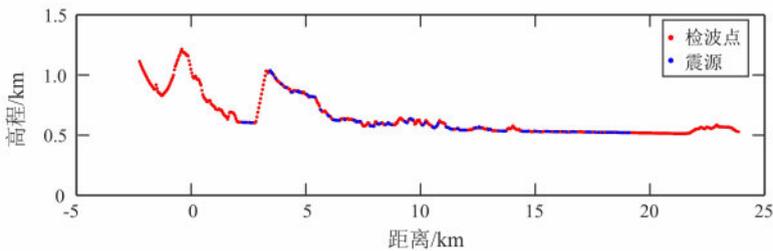


图 10 实测数据观测系统高程分布

Fig. 10 Elevation distribution of measured data observation system

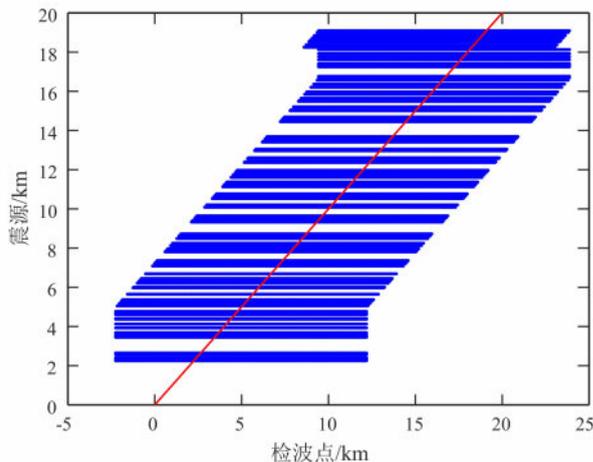


图 11 实测数据观测系统震源与检波点分布

Fig. 11 Source and receiver distribution of measured data observation system

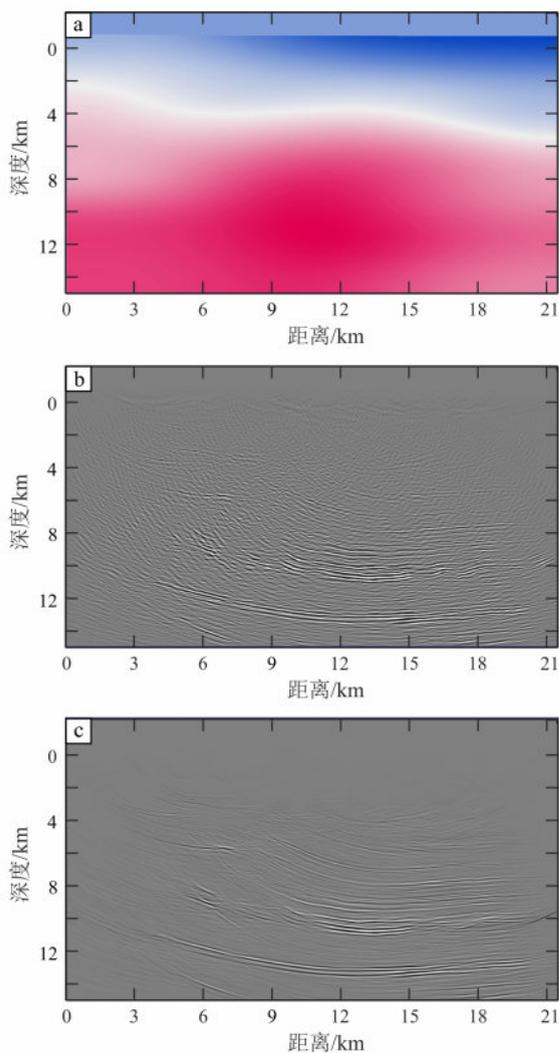
针对实测数据中面临低信噪比的问题, 使用本文提出的起伏地表相干性约束高斯束偏移方法进行成像。图 12a 是已提取出的背景速度模型。图 12b 是利用常规的起伏地表高斯束偏移获得的成像效果, 具有明显的低信噪比和倾斜假成像噪音。图

12c 为利用本文的起伏地表相干性约束高斯束偏移获得的成像效果, 阈值设置 0.2。对比图 12b 和 12c 可知, 相干性约束方法滤掉了大量的随机噪音和倾斜假成像。

图 13 显示了从常规高斯束偏移成像中清理出的噪音分布, 这些噪音绝大部分是随机噪音与倾斜假成像噪音, 除了两个强反射层有些影响, 大部分有效成像改变微弱, 由此验证大部分压制掉的是噪音。

为防止阈值过高导致有效弱反射信号被清除, 我们进行了不同参数设置的相干性约束偏移成像, 如图 14 所示。图 14a 和 14b 分别为 0.05 和 0.1 阈值设置的相干性约束成像效果, 图中还存在一定量的随机噪音与倾斜假成像噪音残余。图 14c 为阈值 0.1 和指数 1 设置情况下的相干性约束成像效果, 成像与阈值 0.2 情况 (图 12c) 下类似。因此, 阈值设置与指数强化可以达到类似的成像优化效果。

实测数据测试验证了本文提供的起伏地表相干性约束高斯束偏移方法在低信噪比噪音压制与成像优化方面的有效性。



a. 速度模型; b. 常规高斯束偏移成像; c. 相干性约束高斯束偏移成像 (阈值 0.2)。

图 12 实测数据相干性约束偏移成像  
Fig. 12 Coherence constraint migration of measured data

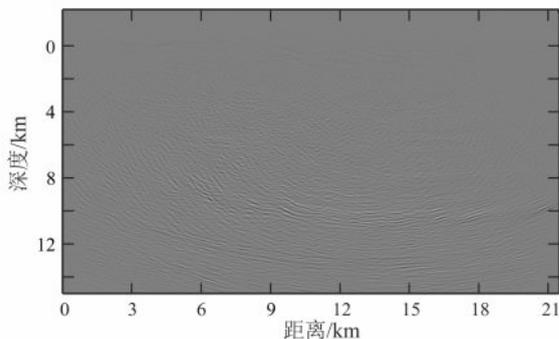
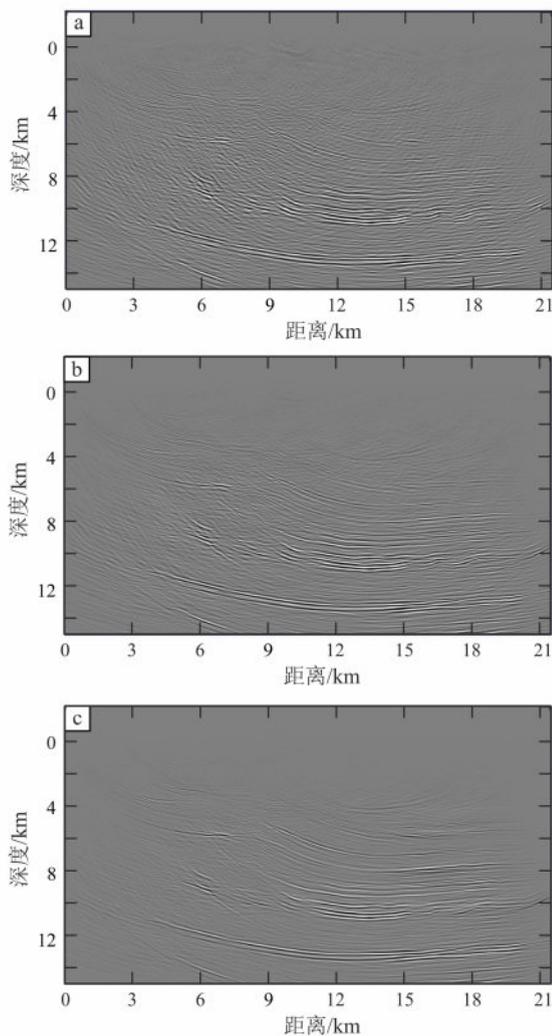


图 13 相干性约束偏移清理掉的噪音分布  
Fig. 13 Removed noise distribution using proposed coherence constraint migration



a. 阈值 0.05, 指数 0; b. 阈值 0.1, 指数 0; c. 阈值 0.1, 指数 1。

图 14 不同参数设置的实测数据相干性约束偏移成像  
Fig. 14 Coherence constraint migration of measured data using different parameters

## 4 结论

(1) 针对山地低信噪比地震数据面临的常规成像困难问题, 提出了起伏地表相干性约束高斯束偏移方法。

(2) 通过时移误差修正, 消除了由于高程起伏导致的常规射线束分解不准确问题, 确保了结构成像定位的准确性。

(3) 通过设计水平投影等效离散间隔来代替常规高斯束偏移的束中心点与检波点离散间隔, 解决了起伏地表偏移存在的成像幅值不均衡问题。

(4) 提出了新型的复数域加权相干谱统计方法, 提高了相干谱计算的稳定性, 并在此基础上设计了有效反射信号的阈值提取和指数强化方法, 实现了随机噪声与非相干性假成像的有效压制。

#### 参考文献:

- [1] STOFFA P, BUHL P, DIEBOLD J, et al. Direct mapping of seismic data to the domain of intercept time and ray parameter; a plane-wave decomposition [J]. *Geophysics*, 1981, 46 (3): 255–267.
- [2] HU C, STOFFA P. Slowness-driven Gaussian-beam prestack depth migration for low-fold seismic data [J]. *Geophysics*, 2009, 74 (6): WCA35–WCA45.
- [3] YANG J, ZHU H. A practical data-driven optimization strategy for Gaussian beam migration [J]. *Geophysics*, 2018, 83 (1): S81–S92.
- [4] 吕考考, 徐基祥, 张才, 等. 数据驱动的控制束偏移方法 [J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54 (4): 805–813.  
LV K K, XU J X, ZHANG C, et al. Data-driven control beam migration method [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54 (4): 805–813.
- [5] 黄建平, 吴建文, 杨继东, 等. 一种  $\tau$ - $p$  域二维控制束成像方法 [J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51 (2): 342–349.  
HUANG J P, WU J W, YANG J D, et al. A 2D control beam migration in the  $\tau$ - $p$  domain [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51 (2): 342–349.
- [6] 吴建文, 于宗泽, 肖波, 等. 基于  $\tau$ - $p$  域动态聚焦控制束偏移方法 [J]. *地球物理学进展*, 2022, 37 (4): 1631–1639.  
WU J W, YU Z Z, XIAO B, et al. Dynamic focused of controlled beam migration in  $\tau$ - $p$  domain [J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37 (4): 1631–1639.
- [7] SUN H, ZHANG Z, HU G, et al. Kirchhoff beam migration based on compressive sensing [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 26520–26529.
- [8] SUN H, GAO C, ZHANG Z, et al. High-resolution anisotropic prestack Kirchhoff dynamic focused beam migration [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20 (20): 11753–11760.
- [9] HILL N R. Gaussian beam migration [J]. *Geophysics*, 1990, 55 (11): 1416–1428.
- [10] HILL N R. Prestack Gaussian-beam depth migration [J]. *Geophysics*, 2001, 66: 1240–1250.
- [11] GRAY S H. Gaussian beam migration of common-shot records [J]. *Geophysics*, 2005, 70 (4): S71–S77.
- [12] ALKHALIFAH T. Gaussian beam depth migration for anisotropic media [J]. *Geophysics*, 1995, 60 (5): 1474–1484.
- [13] ZHU T, GRAY S, WANG D. Prestack Gaussian-beam depth migration in anisotropic media [J]. *Geophysics*, 2007, 72 (3): S133–S138.
- [14] GRAY S H, BLEISTEIN N. True-amplitude Gaussian-beam migration [J]. *Geophysics*, 2009, 74 (2): S11–S23.
- [15] 岳玉波. 复杂介质高斯束偏移成像方法研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东). 2011.  
YUE Y B. Study on Gaussian beam migration methods in complex medium [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2011.
- [16] 段鹏飞, 程玖兵, 陈爱萍, 等. TI 介质局部角度域高斯束叠前深度偏移成像 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56 (12): 4206–4214.  
DUAN P F, CHENG J B, CHEN A P, et al. Local angle-domain Gaussian beam prestack depth migration in a TI medium [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56 (12): 4206–4214.
- [17] LI X L, MAO W J, SHI X, et al. Elastic 3D PS converted-wave Gaussian beam migration [J]. *Geophysics*, 2018, 83 (3): S213–S225.
- [18] 栗学磊, 毛伟建. 多波多分量高斯束叠前深度偏移 [J]. *地球物理学报*, 2016, 59 (8): 2989–3005.  
LI X L, MAO W J. Multimode and multicomponent Gaussian beam prestack depth migration [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59 (8): 2989–3005.
- [19] 孙昌潇, 毛伟建, 张庆臣, 等. 三维最小二乘弹性高斯束叠前深度偏移 [J]. *地球物理学报*, 2021, 64 (11): 4181–4195.  
SUN C X, MAO W J, ZHANG Q C, et al. 3D least-squares elastic Gaussian beam prestack depth migration [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64 (11): 4181–4195.
- [20] DUAN W, MAO W, SHI X, et al. Iterative reweighted least-squares Gaussian beam migration and velocity inversion in the image domain based on point spread functions [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61 (1): 5910412.
- [21] YUE Y, LIU Y, LI Y, et al. Least-squares Gaussian beam migration in viscoacoustic media [J]. *Geophysics*, 2021, 86 (1): S17–S28.

- [22] MAO W, DUAN W, SUN C, et al. Elastic least-squares Gaussian beam imaging with point spread functions [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1–5.
- [23] SHI X, MAO W, LI X. Elastic Gaussian-beam migration for four-component ocean-bottom seismic data [J]. *Geophysics*, 2020, 85 (1): S11–S19.
- [24] CHEN C, YANG J D, MU X R, et al. 2D Q-compensated multi-component elastic Gaussian beam migration [J]. *Petroleum Science*, 2023, 20 (1): 230–240.
- [25] SHI X, MAO W, LI X, et al. Elastic common-receiver Gaussian beam migration of 4C ocean-bottom node data [J]. *Geophysics*, 2023, 88 (3): S115–S130.
- [26] ČERVENÝ V, POPOV M M, PŠĚNCÍK I. Computation of wave fields in inhomogeneous media – Gaussian beam approach [J]. *Geophysical Journal International*, 1982, 70 (1): 109–128.
- [27] ČERVENÝ V, PŠĚNCÍK I. Gaussian beams in two-dimensional elastic inhomogeneous media [J]. *Geophysical Journal International*, 1983, 72 (2): 417–433.
- [28] ČERVENÝ V. *Seismic ray theory* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 234–416.
- [29] 岳玉波, 李振春, 钱忠平, 等. 复杂地表条件下保幅高斯束偏移 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55 (4): 1376–1383.  
YUE Y B, LI Z C, QIAN Z P, et al. Amplitude-preserved Gaussian beam migration under complex topographic conditions [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55 (4): 1376–1383.
- [30] 井西利, 杨长春, 王世清. 一种改进的地震反射层析成像方法 [J]. *地球物理学报*, 2007, 50 (6): 1831–1836.  
JING X L, YANG C C, WANG S Q. An improved seismic reflection tomographic method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50 (6): 1831–1836.

## CERTIFICATE OF CAS CONTENT ACQUISITION

This certifies that articles published in

***Global Geology***

**世界地质 (ISSN 1004-5589)**

are selected and included in the CAS Content Collection™

**November 8, 2024**



Name: Hong Xie  
Title: Assistant Director, Content Acquisitions and Preparation

Number: 202420823



CAS  
A Division of the  
American Chemical Society