VTI介质中传播黎曼波场外推算子的优化及应用——伪深度域最小二乘逆时偏移

Hussein Muhammed[1ID]、孙晓东*[1], Li Zhenchun[1], Abdel Hafiz Gad El Mula[2]

1.中国石油大学（华东），地球科学与技术学院，地球物理系，中国青岛 266580。2.喀土穆大学，理学院，地质系，苏丹喀土穆邮政信箱 321，邮编 11115

*通讯地址：中国石油大学（华东），山东省青岛市黄岛区长江西路西段66号，邮编266580，中国。（孙晓东：wanliliuyun@163.com / sunxd@upc.edu.cn）

中文摘要

最小二乘逆时偏移 的总体框架包括两个步骤：第一步是生成 逆时偏移 图像，第二步是应用最小二乘偏移成像。然而，这两步的收敛过程会耗费大量时间才能提取最终的最小二乘逆时偏移图像，而且模拟过程中还会产生过采样数据。仅对地震数据应用逆时偏移，根据所采用的成像条件会生成带有一些偏移伪影的结果。为克服这一难题，可通过Born建模和共轭梯度算法，将最小二乘逆时偏移应用于偏移成像过程。速度随深度降低的垂直横向各向同性 (VTI) 介质会显著扭曲逆时偏移结果。通过在笛卡尔域或伪深度域中应用适当的波场外推器进行最小二乘逆时偏移，可以解决这一问题。最小二乘逆时偏移外推重建的波场通过二维恒定密度声波方程变换到黎曼域，以均匀采样处理地震信号中的过采样效应，并使最终偏移图像能够恢复更多振幅。对于笛卡尔坐标 (x, y, z) 中的每个点，都有一个对应的垂直时间点，其坐标为 (ξ_1, ξ_2, ξ_3)，因此我们可以通过绘制笛卡尔-黎曼映射函数，将重建的源波场插值到新的射线坐标中。无论采用何种有限差分格式和具体边界条件，黎曼波场外推器都具有广义有限差分公式。有限差分黎曼波场外推器以较低成本作用于 Born 建模地震数据，所得结果与经典 最小二乘逆时偏移 几乎完全一致，但由于各种实现问题以及后者的过采样效应，仍存在一些振幅差异。结果表明，域转换策略能够有效减少计算时间，同时不影响常规 最小二乘逆时偏移 结果的准确性。

关键词： **有限差分建模、黎曼波场、伪深度域中的** 最小二乘逆时偏移**、各向同性和** 垂直横向各向同性 **介质。**

摘要

最小二乘逆时偏移（LSRTM）的一般框架包括两个步骤：首先生成逆时偏移图像，然后进行最小二乘偏移。然而，这两项操作的收敛都需要耗费大量时间才能获得最终的最小二乘逆时偏移图像，而且在模拟数据时还会产生过采样。 对地震数据应用逆时偏移时，根据所采用的成像条件，会产生带有一定偏移伪影的结果。为解决这一问题，可通过 Born 正演建模和共轭梯度算法，对偏移剖面应用最小二乘逆时偏移。随着速度随深度降低，垂直横向各向同性（VTI）介质会产生显著畸变，严重影响逆时偏移结果。采用适当的波场外推器，在笛卡尔域或伪深度域中进行最小二乘逆时偏移，可解决这一问题。利用变换到黎曼域的二维常密度声波方程，对最小二乘逆时偏移重建波场进行外推，可通过均匀采样处理地震信号的过采样效应，并在最终偏移图像中恢复更多振幅。笛卡尔坐标 (x, y, z) 中的每个点都对应一个坐标为 (ξ_1, ξ_2, ξ_3) 的垂直时间点，因此，我们可以通过构建笛卡尔-黎曼映射函数，在新的射线坐标中插值重建的震源波场。无论采用何种有限差分格式和具体边界条件，黎曼波场外推器都具有通用的有限差分公式。黎曼域有限差分波场外推器以较低的计算成本作用于 Born 正演建模地震数据，所得结果与经典最小二乘逆时偏移的结果高度相似且精确；但由于后者存在不同的实现问题和过采样效应，两者的振幅仍有一些差异。结果表明，域变换策略能够有效减少计算时间，同时不影响传统最小二乘逆时偏移结果的精度。

关键词：有限差分建模、黎曼波场、伪深度域最小二乘逆时偏移、各向同性介质和VTI介质。

引言

地震道包含大量可与岩石属性变化相关的信息，但这些信息很容易被不恰当的处理算法掩盖。近年来，有限差分法（FD）求解波传播问题受到了广泛关注；过去几十年来，人们越来越重视利用包含分数阶导数和积分的方程来描述物理和化学过程。这些数学技术具有广泛的潜在应用范围，包括流体动力学、聚合物系统、蛋白质分子的动力学、地震波场延拓，以及复杂地质构造中的污染物扩散；这些都是近期提出的应用领域。波场延拓方法对于结构复杂的地下几何构型尤其具有吸引力，因为这类构型的解析解难以求得。石油勘探中特别关注的几何构型包括会产生绕射的尖角构型。能够兼顾衰减和各向异性的精确、高效地震波场建模，对于地震数据处理方法的进一步发展至关重要。研究表明，所有波场延拓方法都基于两个方程：泰勒级数和特定的波动方程；因此，所有误差都源自这两个公式。分离变量法这一强有力的方法，也可以像应用于热方程和常规扩散方程那样，用于声学波动方程。我们可以通过泰勒误差公式得知这些误差的大小；此外，该方法本身还会放大误差。为了研究这种误差放大现象，我们需要更仔细地考察有限差分法的运作方式。对于包括最小二乘逆时偏移（LSRTM）在内的所有地球物理反演，正演建模都是必不可少的组成部分（Yao 等，2018年）。它提供了将模型映射到地球物理数据的方法。其数学表达式还为制定反演算法，尤其是梯度的制定，提供了理论基础。偏移成像旨在确定反射体模型；然而，波动方程并未显式包含代表反射体的此类模型参数。因此，有必要对波动方程重新参数化，将这一参数纳入τ域波场偏移成像的正演建模公式中。

随着计算能力和数值建模技术的发展，理论物理学与计算数学迎来了革命性的时代，推动了地震数据处理领域的发展（Wang 等，2014年；Yao 等，2016年），逆时偏移已成为一种成熟的

工业应用偏移算法（Sava 和 Fomel，2003；Zhang 等，2007；Xu 等，2011年）。然而，逆时偏移中记录数据的反向传播步骤采用了其正演建模的伴随算子。此外，逆时偏移广泛使用的成像条件是零延迟互相关成像条件（Claerbout，1971；Claerbout 和 Doherty，1972），而非反褶积成像条件。这是因为零延迟互相关成像条件无条件稳定，且更便于实现（Yao 和 Jakubowicz，2016年）。这两项局限——伴随算子和零延迟互相关成像条件——会影响逆时偏移地震成像，降低成像结果的分辨率和振幅精度。为减轻这些局限，同时保留逆时偏移的增强特性，人们提出了最小二乘逆时偏移。Born近似用阻抗扰动表示反射体的性质，而Kirchhoff近似则用反射率描述其性质；基于这两种近似的正演建模公式均包含波传播角度（Jaramillo 和 Bleistein，1999年；Bleistein 等，2005；Khaniani 等，2016年；Yao 和 Jakubowicz，2016年）。然而，通过有限差分法（FDM）数值求解波动方程来测量波的传播方向，过程十分复杂且不准确。因此，在常密度假设下，Born近似与出射角无关（Kaplan 等，2010年；Dai 等，2012年；Khalil 等，2013年）。

有限差分法常用于求解地球物理问题，例如波动方程模拟（如 Virieux，1984年、1986年；Robertsson 等，1994；Carcione，1990；Carcione 等，2002；Moczo 等，2007、2011年、2014年；Yao，2013年；Khalil 等，2013年；Savioli 等，2017）。最小二乘逆时偏移通过寻找能够以最小二乘意义拟合观测数据的最优模型来表征反射体。由于使用了逆算子，与逆时偏移相比，最小二乘逆时偏移能够生成分辨率更高、伪影更少、振幅更均衡且得到保留的偏移图像（Dai 等，2012年和2013年；Yao 和 Jakubowicz，2012年；Yao，2013年；Zeng 等，2014年；Zhang 等，2015；Tu 和 Herrmann，2015；Wu 等，2016 年；Sun 等，2018 年）。Qu 等（2021）基于一阶黏声拟微分方程，推导出 Q补偿正向传播算子、Q补偿伴随算子和 Q衰减Born建模算子，并据此开发了 Q最小二乘逆时偏移方法。这些走时方程在一定程度上独立于横向各向同性（TI）介质中的垂直速度（Alkhalifah 等，1997）。然而，要将计算域截断至可管理的大小，就需要采用非反射边界条件（Mulder，2021）。Alkhalifah 等（2001）通过对传统程函方程进行坐标变换，得到了 τ 域波动方程；

随后通过对空间和时间进行逆傅里叶变换，推导出动力学部分，从而建立了 τ 域波动方程。由于程函方程采用高频假设，所得波动方程的振幅精度不足。黎曼波场外推将声波方程的亥姆霍兹方程解推广到非笛卡尔坐标系，因此外推并非严格沿向下方向进行（Sava 和 Fomel，2001；2005）。将传统域地震数据的垂直轴从深度转换为垂直时间或伪深度，会形成非正交黎曼坐标系（Ma 和 Alkhalifah，2013），该坐标系称为伪深度域。在新的坐标框架中，对各向同性介质和各向异性介质进行波场外推，与笛卡尔域外推相比，可提高效率。本研究旨在采用投影到 τ网格上的有限差分格式，而非规则笛卡尔网格，以提高最小二乘逆时偏移处理数据的投影效率并缩短计算时间；减少速度波场的过采样；获得结构更清晰、信噪比（SNR）更高、分辨率更高、振幅更均衡且得到保留的成像结果；并去除由地表地形引起的偏移伪影和绕射噪声。为检验这种变换，我们给出合成数据的结果，并将其与相应的笛卡尔坐标结果进行比较。伪深度域中的单程波动方程最小二乘逆时偏移可通过以下方式实现（参见 Sun 等，2017；2018）：将速度场从深度域转换到伪深度域，然后在伪深度域中计算波场。对于总计有 S 个炮的固定排列采集勘探，传统逆时偏移的计算成本约为 S_α （α 为一次偏移运算的成本）。Dai 等（2012）估算了相位编码最小二乘逆时偏移相对于传统逆时偏移的加速比：$speedup \approx \frac{S}{2NI}$，其中，$N$ 为子超级道集，2NIα 为计算成本，I 为迭代次数。假设每次最小二乘逆时偏移迭代的成本是一次逆时偏移运算的两倍。因此，该加速比是理论最优结果，在实际应用中可能难以实现。

最小二乘逆时偏移的一般框架

根据Born线性化近似，地震波场可视为扰动波场与背景波场的组合。时间空间域中的标量波动方程可表示为Dai和Schuster（2009）以及Sun等人（2017）所述的形式。正演Born建模可简洁地表示为矩阵向量乘法，该乘法将反射率模型与

散射地震数据线性关联起来（Jizhong Yang等人，2016）。将正演 Born 建模算子的伴随算子作用于散射地震数据，即可计算出标准偏移图像（Claerbout，1992）。最小二乘偏移旨在通过最小二乘意义下最小化正演模拟数据与记录数据之间的差异，求解更新后的反射率模型。最小二乘法有两种数学求解方法：共轭梯度法和最速下降算法。

该过程得到的初始偏移图像是目标反射率图像经海森算子模糊后的版本。如果海森算子是单位矩阵，那么偏移算子将产生与 LSM 相同的结果。然而，在许多情况下，海森算子并非单位矩阵，因为其主对角线元素并不均匀且不等于 1，非对角线分量也不为零（Chavent and Plessix, 1999; Nemeth et al., 1999; Plessix and Mulder, 2004; Valenciano et al., 2006; Tang, 2009; Ren et al., 2011 IN Jizhong Yang et al. 2016）。如图 5、6、7、8 所示，迭代次数越多，失配函数中的差异就越小。随着迭代次数增加，偏移成像结果逐渐收敛于真实地下图像，如图 1、2、3、4 所示的 Marmousi 模型。在本实验中，采用具有规则网格、四阶空间有限差分格式和二阶时间有限差分格式的二维常密度声波方程，并使用完全匹配层（PML）边界条件来生成逆时偏移数据（程序由第二作者提供）。我们可以清楚地看到，图 4 展示了 Marmousi 模型的理想结果；然而，该程序耗时较长，生成最优 Marmousi 反射率图像花费了 20 小时 23 分钟。

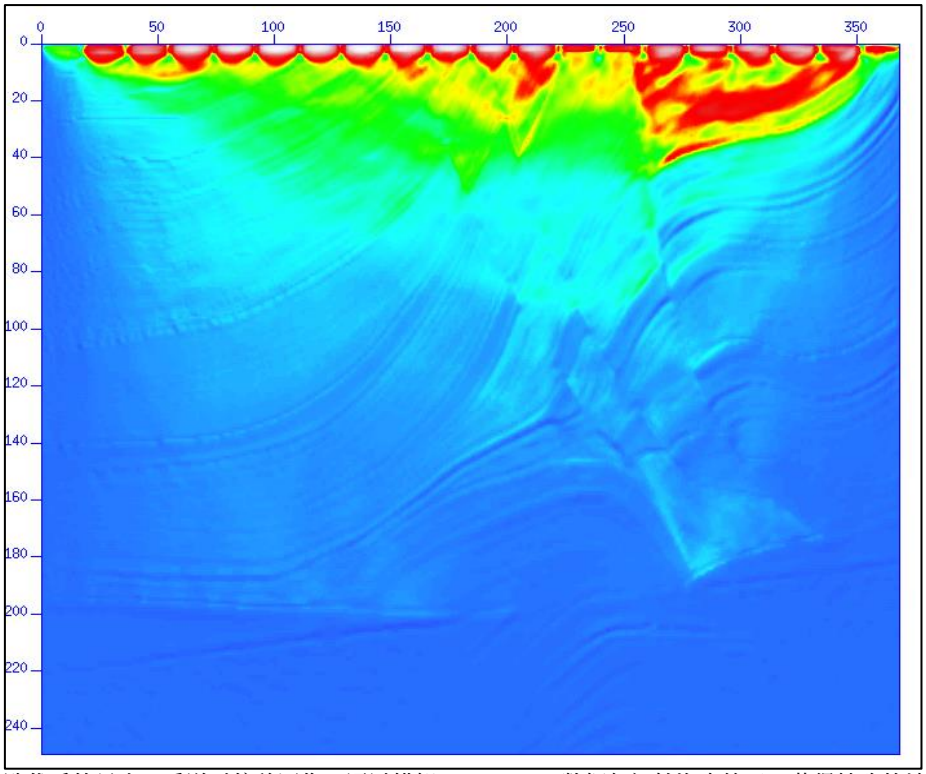

图1：经过1次迭代后的最小二乘逆时偏移图像，通过模拟 Marmousi 数据与初始海森算子，获得精确的地球反射率图像。

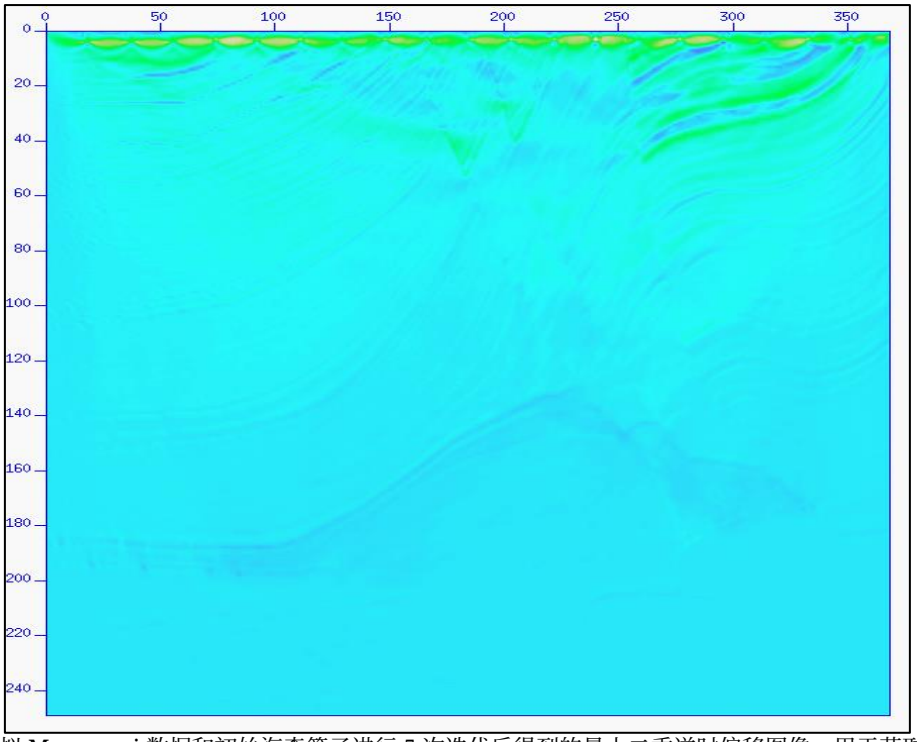

图2：利用模拟 Marmousi 数据和初始海森算子进行 5 次迭代后得到的最小二乘逆时偏移图像，用于获取准确的地球反射率图像。

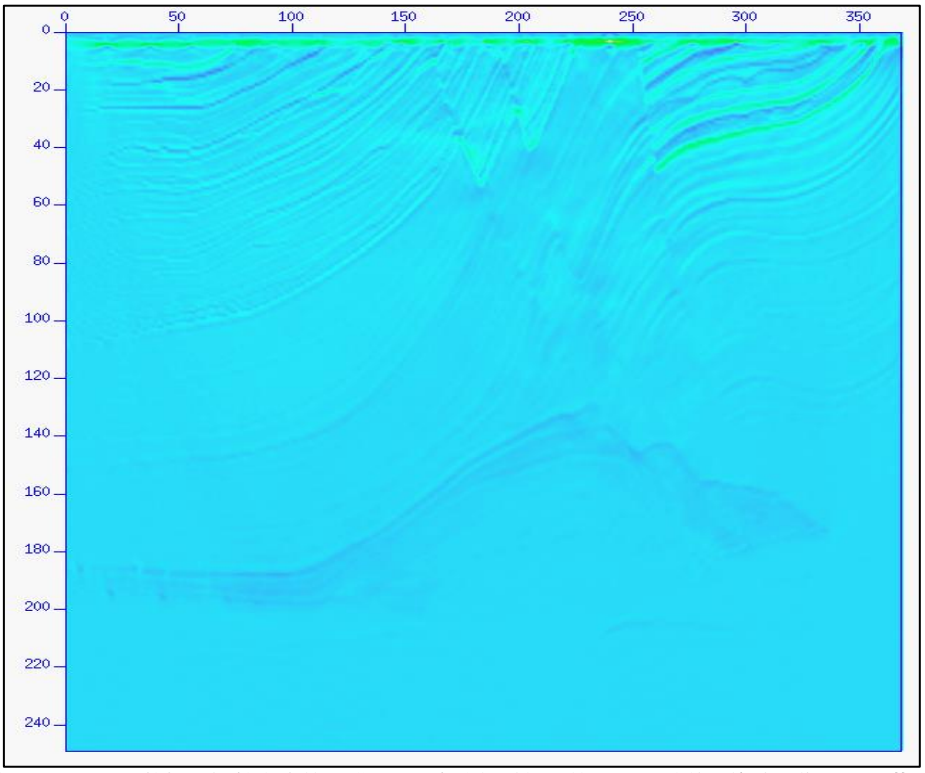

图3：利用模拟 Marmousi 数据和初始海森算子进行 16 次迭代后得到的最小二乘逆时偏移图像，用于获取准确的地球反射率图像。

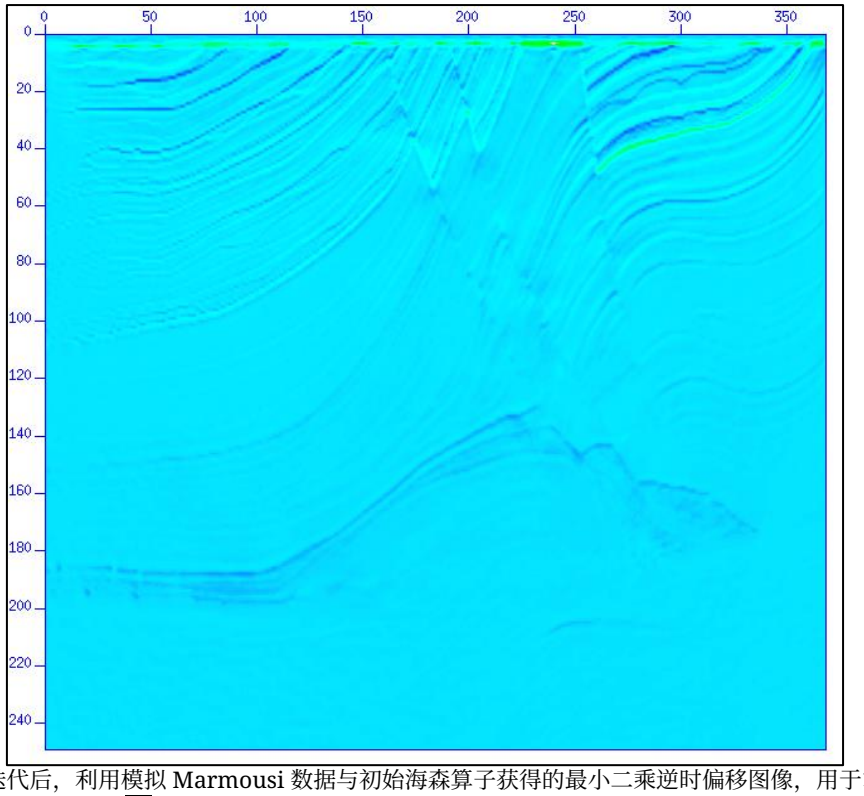

图4：经过30次迭代后，利用模拟 Marmousi 数据与初始海森算子获得的最小二乘逆时偏移图像，用于求取准确的地球反射率图像。

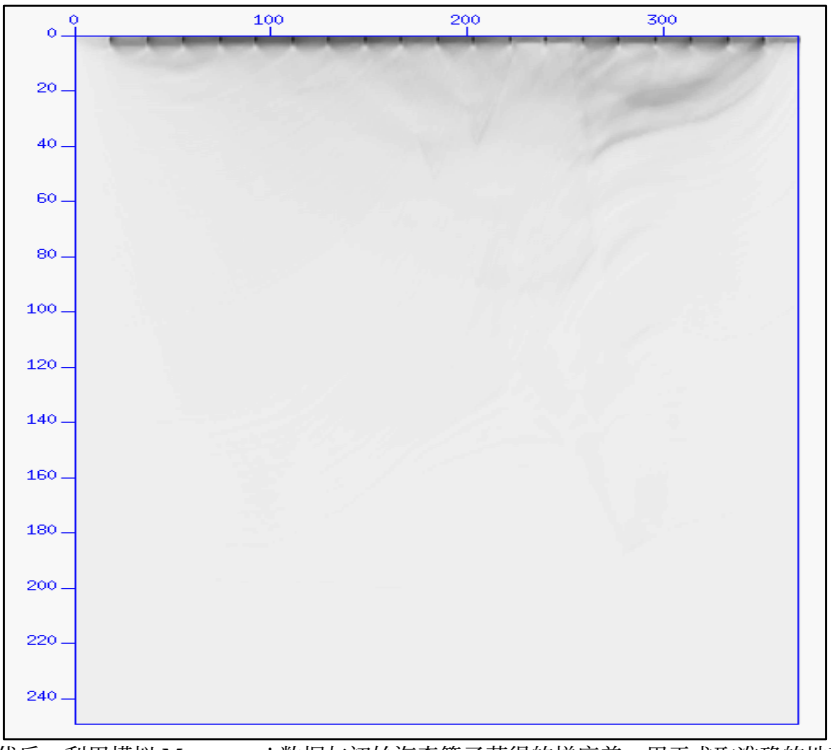

图5：经过1次迭代后，利用模拟 Marmousi 数据与初始海森算子获得的梯度差，用于求取准确的地球反射率图像。

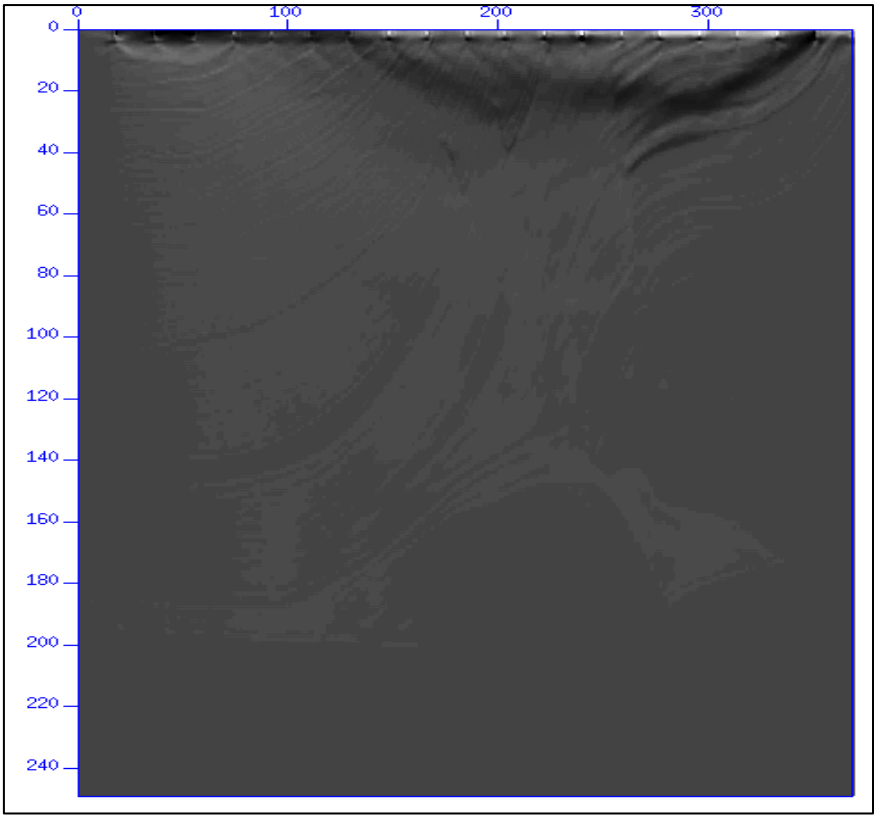

Fig.6:经过5次迭代后，模拟 Marmousi 数据与初始海森算子之间的梯度差，用于获取准确的地球反射率图像。

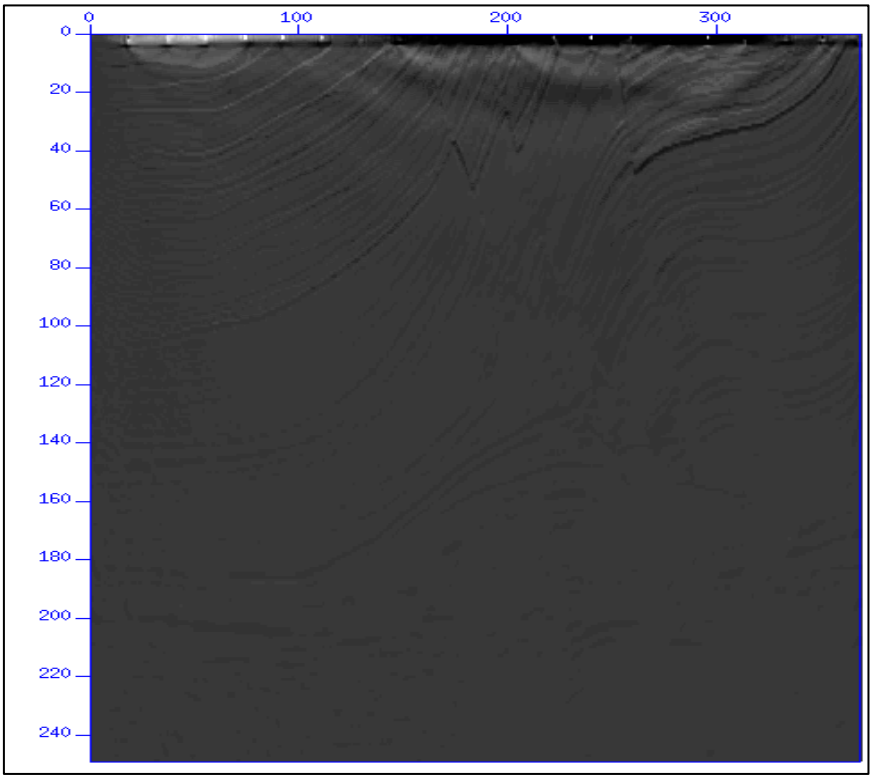

图7：经过 16 次迭代后，模拟 Marmousi 数据与初始海森算子之间的梯度差，用于求得准确的地球反射率图像。

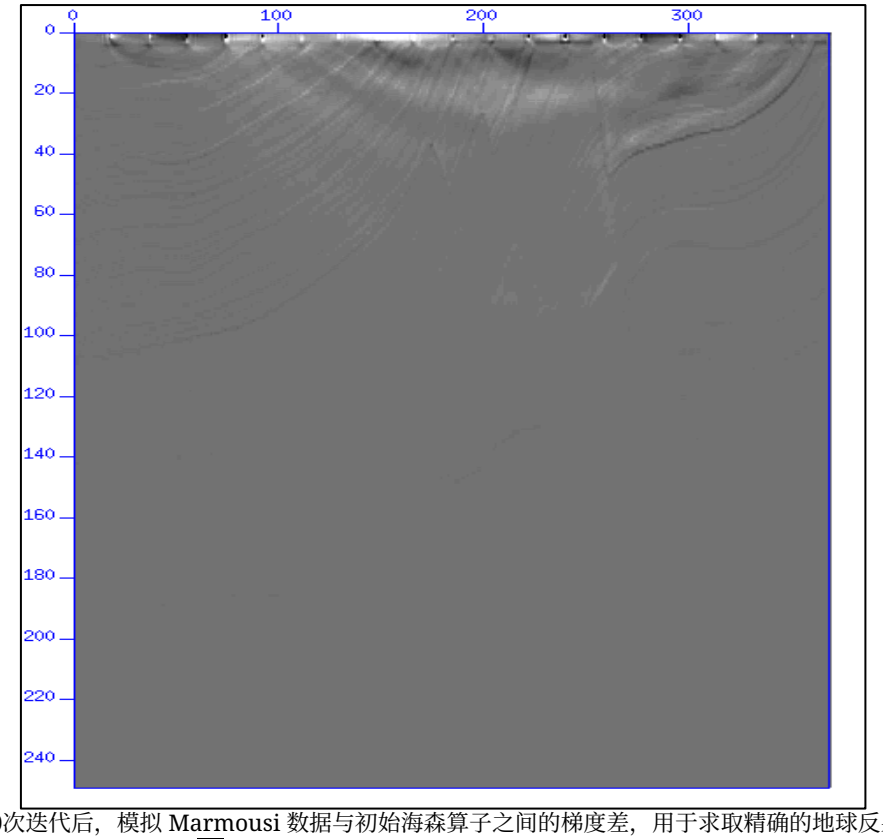

图8：在经过30次迭代后，模拟 Marmousi 数据与初始海森算子之间的梯度差，用于求取精确的地球反射率图像。

反射射线坐标系

传统地震剖面有两个坐标轴；一个是水平轴（距离），另一个是垂直轴（时间）。垂直时间轴 -tau (τ) 是时间偏移成像的垂直轴（Claerbout，1985；Yilmaz，2001；Sava 和 Fomel，2005；Shragge，2008；Khalil 等，2013；Ma 和 Alkhalifa，2013；Sun 等，2018）。对于传统时间图像应用，它被定义为地表上震源与接收器重合时测得的双程走时；该方程用于横向不变介质。要将深度点（x, y, z）投影到坐标为（ξ_1, ξ_2, ξ_3）的垂直时间点，垂直轴通过关系式（Sun 等，（201）8；Ma 和 Alkhalifa，（2013））转换为时间轴 τ：

$$\tau_{TW} = 2\int_0^z \frac{dz'}{v(z')} \tag{1}$$

逆映射也很简单，由反函数求导可得：

$$z(x, y, \tau) = \int_0^\tau v_m(x, y, \tau')d\tau', \tag{2}$$

两个坐标系之间的关系如下：

$$\xi_1 = x_1, \quad \xi_2 = x_2, \quad \xi_3 = \tau = \int_0^{x_3} \frac{dx_3'}{v_m(x_1,x_2,x_3')} \tag{3}$$

基于上述变换，我们可以在笛卡尔域和$\boldsymbol{\tau}$ 域之间对任意地震空间函数进行插值（Ma和Alkhalifa，2013年）。新的坐标系（即$\boldsymbol{\tau}$域）是一个连续变化的坐标系，被称为射线坐标（Sava和Fomel，2005）。新的坐标映射函数可以通过射线追踪或惠更斯波前追踪轻松求得（Sava和Fomel，2001；2005）。

黎曼坐标中的波动方程

i-亥姆霍兹波动方程

亥姆霍兹波动方程描述了波动方程的一种与时间无关的形式，它是在应用有限差分法（FD）时通过分离变量法得到的，目的是降低分析的复杂性。用于地震波场模拟的波动方程形式是对弹性动力学方程的简化，即将剪切波速度设为零。在$\boldsymbol{\Omega}$ 域的频率域中，声学波动方程可表示为:

$$-\frac{\omega^2}{\rho c^2} p - \nabla.\left(\frac{1}{\rho}\nabla p\right) = s, \tag{4}$$

其中，压力$p(\omega, \mathbf{x})$取决于角频率ω和位置x；$\in \Omega$, $\rho(\mathbf{x})$为密度，c(x)为声速，$s(\omega, \mathbf{x})$表示源项，(∇)是一个典型的狄拉克δ函数。波传播过程中存在衰减时，复声速也与频率有关（Aki和Richards，2002），因此式（13）变为:

$$\frac{1}{c(\omega,\mathbf{x})} = \frac{1}{c_0(\mathbf{x})}\left[1 - \frac{1}{\pi \mathrm{Q}}\log\left(\frac{\omega}{2\pi f_{\mathrm{ref}}}\right) + \frac{i}{2\mathrm{Q}}\right], \tag{5}$$

其中，$\mathrm{Q}(\mathbf{x})$为品质因数，且对数项包含参考频率f_{ref}。冯·诺伊曼稳定性分析中使用的复波数定义为 $\mathrm{k}(\omega, \mathbf{x}) = \omega/c(\omega, \mathbf{x})$。方程（14）应与适当的吸收边界条件结合，通常为零狄里赫莱条件。于是，三维黎曼空间中传播波的亥姆霍兹波动方程为（Sava 和 Fomel，2004）:

$$\frac{1}{\alpha J} = \left[\frac{\partial p}{\partial \zeta}\left(\frac{J}{\alpha}\frac{\partial \mathcal{U}}{\partial \zeta}\right) + \frac{\partial}{\partial \xi}\left(G\frac{\alpha}{J}\frac{\partial \mathcal{U}}{\partial \xi} - F\frac{\alpha}{J}\frac{\partial \mathcal{U}}{\partial \eta}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(E\frac{\alpha}{J}\frac{\partial \mathcal{U}}{\partial \eta} - F\frac{\alpha}{J}\frac{\partial \mathcal{U}}{\partial \xi}\right)\right] = -\frac{\omega^2}{v^2}\mathcal{U} \tag{6}$$

其中，$\mathcal{U}$ 为标量函数，ω 为时间频率，$v[\mathbf{x}(\xi, \eta, \zeta)]$ 为波传播速度，$\mathcal{U}$ 表示传播波，E, F, G和α 为微分形式（$J^2 = EG - F^2$）。然而，新黎曼坐标系中的波动方程有两个波场公式（Ma 和 Alkhalifah，2013年），如下所示:

ii-各向同性介质

通过将波动方程中的梯度算子和散度算子代入，建立了 **τ**域双程波动方程，得到以下方程组：

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = v^2\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}\right) + \frac{v^2}{v_m^2}\frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} - \frac{v^2}{v_m^3}\frac{\partial v_m}{\partial \tau}\frac{\partial p}{\partial \tau}. \quad (7)$$

(7) 中的最后一项 $\frac{v^2}{v_m^3}\frac{\partial v_m}{\partial \tau}\frac{\partial p}{\partial \tau}$ 仅影响外推波场的振幅，因此在外推过程中可以忽略。

iii-VTI介质

垂直对称轴横向各向同性（VTI）介质中的准P波运动可由以下二阶方程组描述（Duveneck and Bakker，2011年；In Ma and Alkhalifah，2013年）：

$$\frac{\partial^2 p_H}{\partial t^2} = (1+2\eta)v^2\left[\left(\frac{\partial}{\partial \xi_1} + \sigma_1\frac{\partial}{\partial \xi_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial \xi_2} + \sigma_2\frac{\partial}{\partial \xi_3}\right)^2\right]P_H + \frac{vv_v}{v_m}\frac{\partial}{\partial \xi_3}\left(\frac{1}{v_m}\frac{\partial p_V}{\partial \xi_3}\right)$$

$$\frac{\partial^2 p_V}{\partial t^2} = vv_v\left[\left(\frac{\partial}{\partial \xi_1} + \sigma_1\frac{\partial}{\partial \xi_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2}{\partial \xi_2} + \sigma_2\frac{\partial^2}{\partial \xi_3}\right)^2\right]P_H + \frac{v_v^2}{v_m}\frac{\partial}{\partial \xi_3}\left(\frac{1}{v_m}\frac{\partial p_V}{\partial \xi_3}\right). \quad (8)$$

其中，p_H 和 p_V 分别为水平应力和垂直应力，-q 为质点动量，v_v为垂直速度，v_m为映射速度，η 为椭圆率（$\eta = \epsilon - \frac{\delta}{1+2\delta}$），正常时差速度由（$v = v_v\sqrt{1+2\delta}$）给出，$\epsilon$和 δ 为Thomsen参数（Thomsen，1986年；In Ma and Alkhalifah，2013年）。我们将通过有限差分格式求解VTI介质中的波传播方程（8）。

边界条件与非正交有限差分解

提取地震散射波场时，只对有限的模型空间进行模拟，并使用人工边界截断计算模型。这些人工边界会产生伪一次波，进而在外推的散射波场（即偏移剖面）中形成伪影。将吸收边界条件与有限差分格式结合使用，即可解决这一问题。目前已有许多不同的边界条件可供使用，但目前公认效果最好的吸收边界条件是完全匹配层（PML）（Berenger 1994；Chew 和 Liu，1996；Liu 和 Tao，1997；Yao，2013年）。PML 条件会创建一种虚拟介质，该介质不会反射任何入射波，同时还会使任何在其中传播的波呈指数衰减

此外，它还能消除模型边界处的人工反射，但计算和内存开销较大。适用于各向同性与各向异性声波方程的卷积完全匹配层（CPML）边界条件（Pasalic 和 McGarry，2010），其方程可表示为带有附加校正项的常规波动方程。VTI介质的 CMPL 边界条件可表示为以下方程组（Pasalic 和 McGarry，2010）：

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + c_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + c_z \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + c_x\left(\frac{\partial \psi_{p,x}}{\partial x} + \zeta_{p,x}\right) + c_y\left(\frac{\partial \psi_{p,y}}{\partial y} + \zeta_{p,y}\right) + c_z\left(\frac{\partial \psi_{r,z}}{\partial z} + \zeta_{r,z}\right)$$

$$\frac{\partial^2 R}{\partial t^2} = d_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + d_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + d_z \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + d_x\left(\frac{\partial \psi_{p,x}}{\partial x} + \zeta_{p,x}\right) + d_y\left(\frac{\partial \psi_{p,y}}{\partial y} + \zeta_{p,y}\right) + d_z\left(\frac{\partial \psi_{r,z}}{\partial z} + \zeta_{r,z}\right). \quad (9)$$

其中，P, R 为伪声学波场，c_i & d_i $(i \in \{x, y, z\})$为速度系数，ψ为具有时间演化的辅助变量，而$\zeta_{p,i}$,$\zeta_{p,i}$ 为如下所示的辅助变量：

$$\zeta_{p,i}^n = a_i \zeta_{p,i}^{n-1} + b_i \left[\left(\frac{\partial^2 P}{\partial i^2}\right)^n + \left(\frac{\partial \psi_{p,i}}{\partial i}\right)^n\right].$$

参数a_i 和b_i 由下式给出：$a_i = e^{-(\sigma_i + \alpha_i)\Delta t}$ ； $b_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_i + \alpha_i}(a_i - 1)$。 (10)

根据上述亥姆霍兹波动方程（Mulder，2021），在区域 Ω上定义用于实现有限差分解的狄利克雷边界条件，其中； $\Omega = \{(x, z) | x \in [x_{\min}, x_{\max}], z \in [z_{\min}, z_{\max}]\}$，在其余边界$\Gamma_n = \frac{\partial \Omega}{\Gamma_o}$ 上布置有限差分网格以离散化偏微分方程。二维情况下的最低阶格式如下：

$$-k_{i,j}^2 p_{i,j} - \frac{p_{i,j}}{\nabla x^2}\left[\frac{p_{i+1,j} - p_{i,j}}{\rho_{i+1/2,j}} - \frac{p_{i,j} - p_{i-1,j}}{\rho_{i+1/2,j}}\right] - \frac{p_{i,j}}{\nabla z^2}\left[\frac{p_{i,j+1} - p_{i,j}}{\rho_{i,j+1/2}} - \frac{p_{i,j} - p_{i,j-1}}{\rho_{i,j-1/2}}\right] = \rho_{i,j} s_{i,j}, \quad (11)$$

上述公式的最终推导称为区域一侧的数值精确非反射边界条件（Mulder，2021）。最后，Khalil 等人（2013）给出了在广义黎曼坐标系中通过区域受限有限差分格式求解方程（7，8）的结果，如下：

$$u(i, j, k + 1) = 2u(i, j, t) - u(i, j, k - 1) + c_{nn}(i, j)u(i - 1, j - 1, k + \lambda_\tau) + c_{no}(i, j)u(i - 1, j, k + \lambda_\tau) + c_{np}(i, j)u(i - 1, j + 1, k + \lambda_\tau) + c_{on}(i, j)u(i, j - 1, k + \lambda_\phi) + c_{oo}^{\tau}(i, j)u(i, j, k + \lambda_\tau) + c_{oo}^{\phi}(i, j)u(i, j, k + \lambda_\tau) + c_{op}(i, j)u(i, j + 1, k + \lambda_\phi) + c_{pn}(i, j)u(i + 1, j - 1, k + \lambda_\tau) + c_{po}(i, j)u(i + 1, j, k + \lambda_\tau) + c_{po}(i, j)u(i + 1, j + 1, k + \lambda_\tau). \quad (12)$$

黎曼网格模板的系数为：$c_{nn}=\gamma\frac{\beta_{12}}{2\Delta\tau\Delta\phi}$，$c_{oo}^{\phi}=2\gamma(\frac{\beta_{22}}{\Delta\phi^2})$，$c_{no}=\gamma(\frac{\beta_{11}}{\Delta\tau^2}-\frac{\alpha_{11}+\alpha_{21}}{2\Delta\tau})$，$c_{op}=\gamma(\frac{\beta_{22}}{\Delta\phi^2}-\frac{\alpha_{22}+\alpha_{21}}{2\Delta\phi})$，$c_{np}=-c_{nn}$，$c_{pn}=-c_{nn}$，$c_{on}=\gamma(\frac{\beta_{22}}{\Delta\phi^2}-\frac{\alpha_{22}+\alpha_{12}}{2\Delta\phi})$，$c_{po}=\gamma(\frac{\beta_{11}}{\Delta\tau^2}+\frac{\alpha_{11}+\alpha_{21}}{2\Delta\tau})$，$c_{oo}^{\tau}=2\gamma(\frac{\beta_{11}}{\Delta\tau^2})$，$c_{pp}=c_{nn}$，$\gamma=(\Delta tv)^2$.

模板的系数是垂直走时（τ）和出射角（ϕ）的函数（Sava 和 Fomel，2001；2005），据此我们可以定义如公式（3）所示的坐标映射函数，并可通过以下方式粗略估算该方案稳定性所需满足的 CFL 条件：$CFL=\frac{\sqrt{\gamma}}{\tau}$。$\Delta\phi$。外推过程仅需受限于重建的震源波场（Khalil 等，2013），这足以用于伪深度域最小二乘逆时偏移。

数值实验与结果

图 9 展示了利用均匀各向异性速度模型得到的脉冲响应，该模型通过构建特定的计算代码方案生成，其垂直速度为 2.1 km.s^{-1}，正常时差速度为 1.642 km.s^{-1}，椭圆率 η 为 = 0.1。此外，为降低计算成本，τ 域各向异性外推还可减弱与笛卡尔域相关的外推剪切波伪影。图 9b 显示了 τ 域中剪切波伪影的去除情况；由于采用较粗的垂向采样，笛卡尔域中产生的剪切波（图 9a）的数值频散随之增强；图 9c 则展示了两种投影方案之间的信号差异。

图10、图11和图12分别展示了各向异性 Marmousi（VTI）数据集的部分结果，包括在笛卡尔域和黎曼域中进行叠前最小二乘逆时偏移，以及从 τ 域转换回来的结果。原始 Marmousi 数据集包含240炮，每炮96道，总记录时间为2.9秒；该各向异性数据集的主频为30 Hz，最大扩展长度为3.0 km。模型中部分区域在地表位置3 km以下可能具有可反演性。图10和图12中的笛卡尔域最小二乘逆时偏移结果通过应用 Born近似和共轭梯度算法获得；图11将逆时偏移反射率模型转换至 τ 域，虽然使模型得到均衡处理，但仍出现了一些变形。图12中的最终最小二乘逆时偏移结果显示，转换回笛卡尔域后，成像略有增强，这是因为振幅得到了均衡且伪影有所减少。在高速 PC 集群上，使用秒表测得，获得这些结果耗时5小时30分钟。

储层的各个部分均出现在2.0 km至3.0 km之间，但图11中的位置略有偏移，这可能归因于 τ 域中的各向异性波场外推。

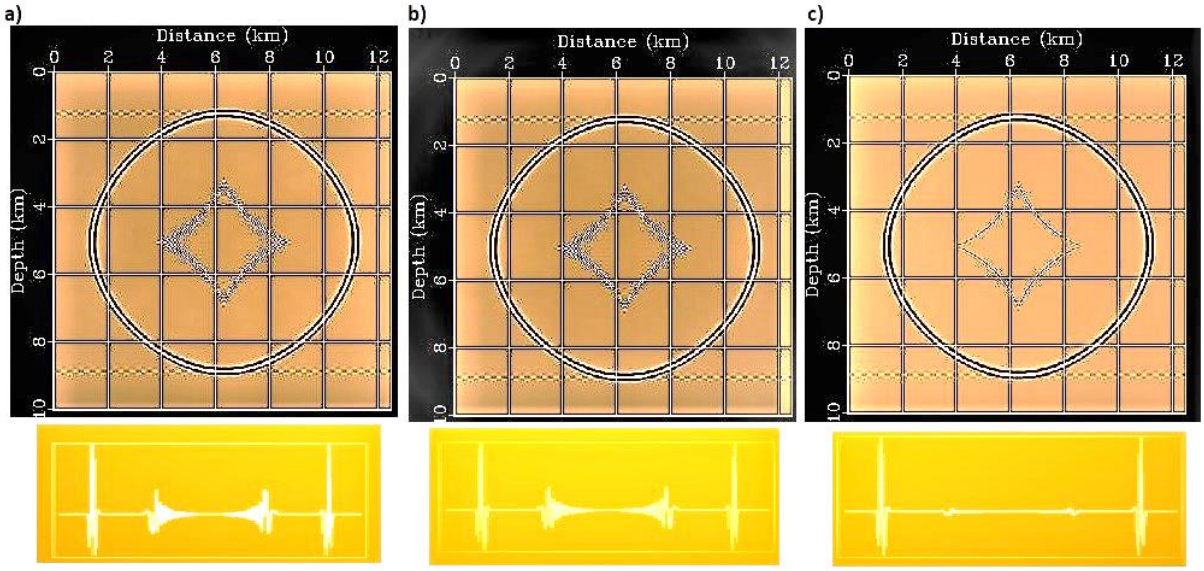

图9：在以下域中获得的各向异性脉冲响应及其对应信号：(a) 笛卡尔域和 (b) 黎曼域。(c) 在 τ 网格上投影后去除的剪切波信号。

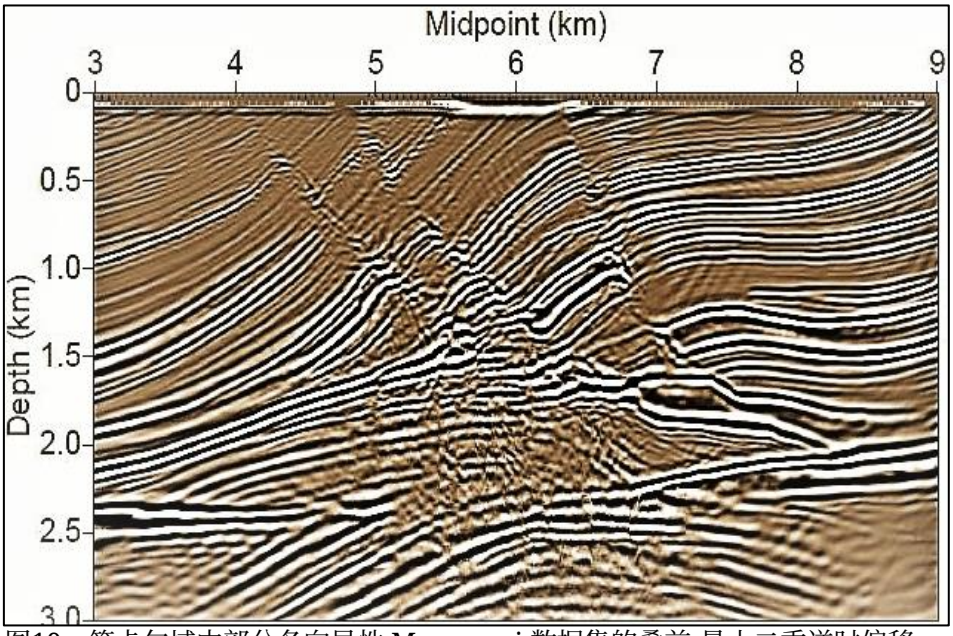

图10：笛卡尔域中部分各向异性 Marmousi 数据集的叠前 最小二乘逆时偏移。

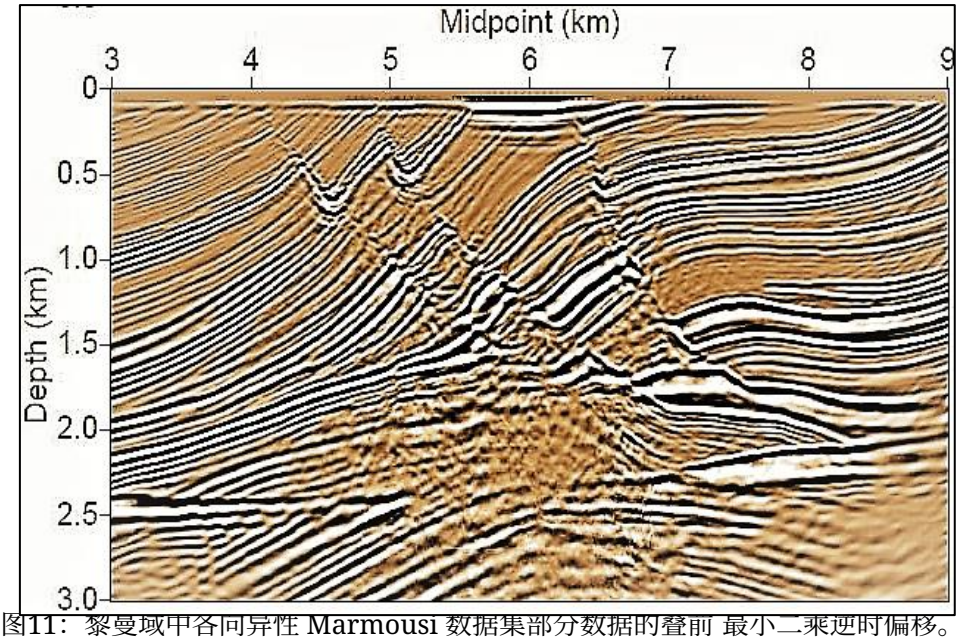

图11：黎曼域中各向异性 Marmousi 数据集部分数据的叠前 最小二乘逆时偏移。

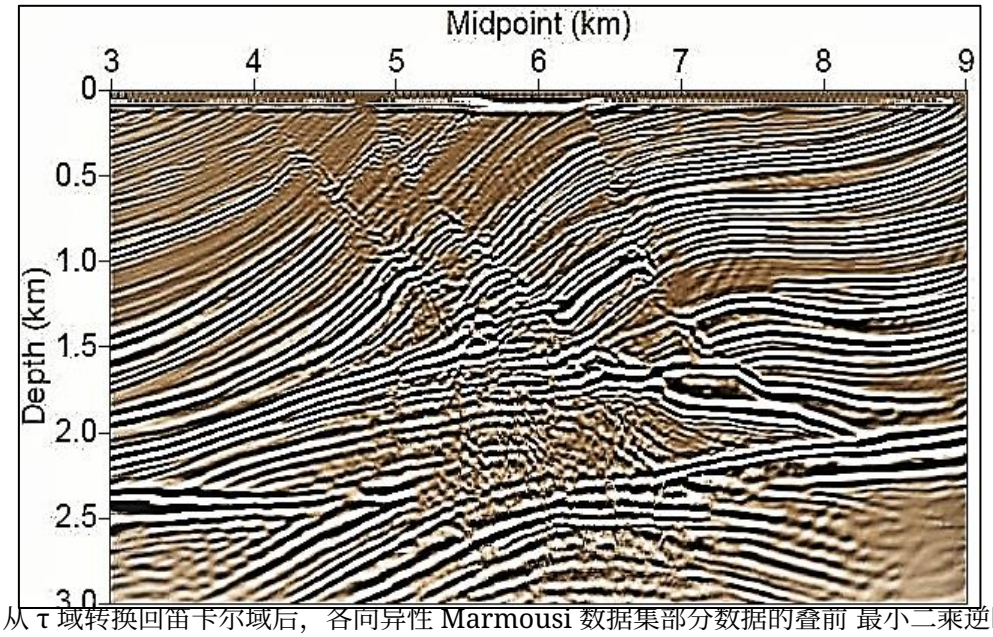

图12：从 τ 域转换回笛卡尔域后，各向异性 Marmousi 数据集部分数据的叠前 最小二乘逆时偏移。

结论

如图4所示，传统最小二乘逆时偏移可获得良好的偏移成像结果。根据定义，黎曼空间由非正交曲线坐标系描述。采用该坐标系进行最小二乘逆时偏移，相比使用笛卡尔网格，可显著加快各向异性最小二乘逆时偏移波场的外推。尽管两种方法的偏移成像结果是在相同迭代次数下获得的，但转换前后最终偏移成像结果的精度几乎相同。然而，当

将VTI地震数据投影到黎曼域时，可以有效去除横波伪影。因此，显然仍需进一步研究以取得更先进的成果，包括处理三维地震数据、对有限差分格式进行稳定性分析、黏声最小二乘逆时偏移以及非线性最小二乘逆时偏移。

致谢

本研究得到国家自然科学基金（41630964）、中央高校基本科研业务费（18CX02059A）、深层油气重点实验室发展基金（20CX02111A）、山东省自然科学基金（ZR2020MD048）以及中国石油天然气集团有限公司重大科技项目（ZD2019-183-003）的资助。

参考文献

❖ Alkhalifah T., (1997), 垂向非均匀TI介质中的地震数据处理, 《Geophysics》62: 662-675. doi: 10.1190/1.1444175.❖ Alkhalifah, T., Fomel, S., & Biondi, B. (2001), 时空域：各向异性介质的理论与建模。Geophysical Journal International, 144(1), 105-113. doi: 10.1046/j.1365-246x.2001. 00300.x.❖ Bleistein, N., Zhang, Y., Xu, S., Zhang, G., and Gray, S. H., (2005), 偏移成像/反演：以~~成像点坐标为思路，以采集面坐~~标进行处理：《Inverse Problems》, 21, 1715–1744. doi:10.1088/0266-5611/ 21/5/013.❖ Carcione, J. M., G. C. Herman, and A. P. E. Ten Kroode, (2002), 地震建模：《Geophysics》, 67, 1304–1325, doi: 10.1190/1.1500393.❖ Claerbout, J. F., (1971), 迈向统一的反射体映射理论：《Geophysics》, 36, 467–481. doi:10.1190/1.1440185.❖ Claerbout, J. F., (1985), 地球内部成像：Blackwell Scientific Publications. doi:10.1111/j.1365-246X.1986.tb01086. x.❖ Claerbout, J., and Doherty, S., (1972), 动校正地震记录的向下延拓：《Geophysics》, 37, 741–768. doi:10.1190/1.1440~~298.❖ Dai, W., &~~ Schuster, G. T. (2013). 平面波最小二乘逆时偏移。《Geophysics》, ~~7~~8(4), S165-S177. Doi: 10.1190/geo2012-0377.1.

❖ Dai, W., Fowler, P. 和 Schuster, G. T.,（2012），多源最小二乘逆时偏移：《Geophysical Prospecting》，60，681–695。doi:10.1111/j.1365-2478.2012.01092.x.❖ Jaramillo, H. H. 和 Bleistein, N.，（1999），Kirchhoff偏移和反偏移与Kirchhoff及Born建模的联系：《Geophysics》，64，1793–1805。doi:10.1190/1.1444685.❖ Jean Virieux，（1984），「非均匀介质中的SH波传播：速度-应力有限-差分法」，《Geophysics》49：1933-1942。doi:10.1190/1.1441605.❖ Jean Virieux，（1986），「非均匀介质中的P-SV波传播：速度-应力有限差分法」，《Geophysics》51：889-901。doi:10.1190/1.1442147.❖ Kaplan, S. T., Routh, P. S. 和 Sacchi, M. D.，（2010），最小二乘炮集剖面分步偏移的正演算子与伴随算子的推导：《Geophysics》，75，S225–S235。doi: 10.1190/1.3506146.❖ Khalil Adel、Hesham Mohamed 和 El-Beltagy Mohamed，（2013），黎曼坐标中的波动方程有限域解，《Geophysics》78：T21-T27。doi:10.1190/geo2012-0027.1.❖ Khalil, A., Sun, J., Zhang, Y. 和 Poole, G.，（2013），使用时移道集进行逆时偏移噪声衰减和图像增强：第83届年度国际会议，SEG，扩展摘要，1–5。Doi:10.1190/IGCBeijing2014-127.❖ Khaniani, H., Bancroft, J. C. 和 von Lunen, E.，（2016），使用叠前时间Kirchhoff近似对临界前反射数据进行迭代多参数波形反演：《Geophysics》，81，R15–R27。doi:10.1190/geo2014-0560.1.❖ Ma X. X. 和 Alkhalifah T.，（2013），伪深度域中的波场延拓，《Geophysics》78：S81-S91。doi: 10.1190/geo2012-0237.1.❖ Moczo, P., J. Kristek 和 M. Galis，（2014），地震动的有限差分模拟：波与破裂：剑桥大学出版社。doi:10.1017/CBO9781139236911.❖ Moczo, P., J. Kristek, M. Galis, E. Chaljub 和 V. Etienne，（2011），分析三维有限差分法、有限元法、间断Galerkin法和谱元格式在P波与S波速度比条件下的精度：《Geophysical Journal International》，187，1645–1667，doi: 10.1111/j.1365- 246X.2011.05221. x.

❖ Moczo, P., J. O. A. Robertsson, and L. Eisner, (2007), 用于地震波传播建模的有限差分时域方法：Advances in Geophysics, 48, 421–516, doi: 10.1016/S0065-2687(06)48008-0.❖ Mulder, W. A., (2021), 应用于声学亥姆霍兹方程的数值精确非反射边界条件，《Geophysics》0: 1-42. doi:10.1190/geo2020-0682.1.❖ Pasalic Damir and McGarry Ray, (2010), 各向同性与各向异性声波方程的卷积完全匹配层，SEG技术会议扩展摘要: 2925-2929. doi: 10.1190/1.3513453.❖ Robertsson, J. O. A., J. O. Blanch, and W. W. Symes, (1994), 黏弹性有限差分建模：《Geophysics》, 59, 1444–1456, doi: 10.1190/1.1443701.❖ Sava, P. and S. Fomel, (2001), 利用惠更斯波前追踪进行三维走时计算：《Geophysics》, 66, 883-889.❖ Sava, P. and S. Fomel, (2005), 黎曼波场外推：《Geophysics》, 70, T45-T56.❖ Sava, P. C., and Fomel, S., (2003), 通过波场延拓方法获得角度域共成像道集：《Geophysics》, 68, 1065–1074. doi:10.1190/1.1581078.❖ Savioli, G. B., J. E. Santos, J. M. Carcione, and D. Gei, (2017), 结合多相流体流动与波传播模拟器的二氧化碳封存和地震监测模型：Sleipner油田案例：Computational Geosciences, 21, 223–239, doi: 10.1007/s10596-016-9607-y.❖ Savioli, G. B., J. E. Santos, J. M. Carcione, and D. Gei, (2017), 结合多相流体流动与波传播模拟器的二氧化碳封存和地震监测模型：Sleipner油田案例：Computational Geosciences, 21, 223–239, doi: 10.1007/s10596-016-9607-y.❖ Shragge Jeffrey Chilver, (2008), 黎曼波场外推：非正交坐标系，《Geophysics》73: T11-T21. doi:10.1190/1.2834879.❖ Tu, N., and Herrmann, F. J., 2015, 通过稀疏反演利用地表相关多次波进行快速成像：Geophysical Journal International, 201, 304–317. doi:10.1093/gji/ggv020.❖ Wang, Y., Liang, W., Nashed, Z., Li, X., Liang, G., and Yang, C., (2014), 使用时空域频散关系保持法优化正则化交错网格有限差分算子进行地震建模：《Geophysics》, 79, T277– T285. doi:10.1190/geo2014-0078.1.

❖ Wu, D., Yao, G., Cao, J., and Wang, Y., 2016, 带L1范数正则化的最小二乘逆时偏移：Journal of Geophysics and Engineering, 13, 666–673. doi:10.1088/1742-2132/13/5/666.❖ Xiaodong Sun, Yanrui Jia and Zhenchun Li (2018). 伪深度域最小二乘逆时偏移及其应用。SEG国际展览会暨第88届年会, pp.4276-4280. doi:10.1190/segam2018 2987198.1.❖ Sun, X. D., Ge, Z. H., & Li, Z. C. (2017). 基于共轭梯度和互相关的最小二乘逆时偏移及其应用。《应用地球物理》, 14(3), 381. doi:10.1007/s11770-017-0626-9.❖ Xu, S., Zhang, Y., and Tang, B., (2011), 逆时偏移获得的三维角度道集：《Geophysics》, 76, S77–S92. doi:10.1190/1.3536527.❖ Yao Gang, (2013), 最小二乘逆时偏移。博士论文，伦敦帝国理工学院（开放获取：http://hdl.handle.net/10044/1/14575）。收录于：地球科学与工程博士论文集。doi: 10.25560/14575.❖ Yao, G., and Jakubowicz, H., (2016). 基于矩阵的最小二乘逆时偏移公式：Geophysical Prospecting, 64, 611–621. doi:10.1111/1365- 2478.12305.❖ Yao, G., and Jakubowicz, H., (2012). 最小二乘逆时偏移： 74th会议与展览，欧洲地球科学家与工程师协会，扩展摘要: 1-5., X043. doi: 10.1190/segam2012-1425.1.❖ Yao, G., da Silva, N. V., & Wu, D. (2018). 最小二乘逆时偏移的正演建模公式。《勘探地球物理学》, 49(4), 506-518. doi:10.1071/EG16157.❖ Yao, G., Wu, D., and Debens, H. A., (2016), 声学介质中地震波场建模的自适应有限差分：《科学报告》, 6, 30302. doi:10.1038/srep30302.❖ Jizhong Yang, Yuzhu Liu, and Liangguo Dong, (2016), “存在密度变化时的最小二乘逆时偏移”，《Geophysics》81: S497-S509. Doi:10.1190/geo2016-0075.1.❖ Yilmaz, O., (2001). 地震数据分析: 地震数据的处理、反演与解释：SEG. doi: 10.1190/1.9781560801580.❖ Zeng, C., Dong, S., Mao, J., and Wang, B., (2014). 用于复杂构造成像的宽频最小二乘逆时偏移：第84届国际年会，SEG，扩展摘要，3715–3719. doi: 10.1190/segam2014-1283.1.

❖ Zhang, Y.、Duan, L. 和 Xie, Y.（2015），最小二乘逆时偏移的稳定实用实现：《Geophysics》，80，V23–V31。doi:10.1190/geo2013-0461.1。❖ Zhang, Y.、Sun, J. 和 Gray, S.（2007），逆时偏移：振幅与实现问题：第77届国际年会，SEG，扩展摘要，2145–2149。doi:10.1190/1.2792912。

Hussein Abduelhaleim Hussein Muhammed，（1993年4月18日），男，电话：**+86**-1562142317 **5**



获苏丹喀土穆大学地质学理学荣誉学士学位（2015年10月）。目前是中国石油大学（华东）地球物理系硕士生。研究兴趣包括：地震勘探方法、有限差分法与有限元法建模、地震波传播、成像和反演。

孙晓东博士（讲师）



硕士生导师。地球物理学讲师。专长领域：地震传播、地震成像、地震反演。其研究兴趣包括：地震波；传播、成像、反演、逆时偏移、最小二乘逆时偏移、全波形反演及反演方法。

李振春教授



中国石油大学地球科学与技术学院地球物理系主任。硕士生和博士生导师。他是地震波传播与成像（SWPI）研究组组长。

2021 年“油气•智能 @未来科学家”研究生国际学术论坛(2 号通知)

石油与天然气能源在国民经济和社会发展中发挥着重要作用，人工智能及大数据的发展为深层—超深层和非常规油气勘探开发提供了重要支撑，对复杂领域油气资源进行智能、高效勘探开发已成为重要研究热点。为了进一步拓宽研究生的学术视野，提高研究生的创新能力，搭建国际学术交流平台，中国石油大学(华东)将承办山东省2021年“未来科学家”研究生国际学术论坛，拟于2021年11月上旬在中国石油大学(华东)青岛校区举办。

本次“未来科学家”研究生国际学术论坛将围绕“油气+智能”和“人才培养”主题，充分利用中国石油大学(华东)地质资源与地质工程一流学科资源优势和现有的 2 个创新引智基地等优质资源，邀请国内外知名专家作专题报告，帮助研究生了解学科前沿动态，学习借鉴国内外最新成果，开拓研究生国际视野；搭建研究生国际学术交流平台，促进研究生和国内外知名专家学者的学术交流，通过共同研讨，为提升研究生培养质量贡献力量。

本次论坛将设置“油气+智能与未来”主题论坛和“油气勘探”专题论坛，并邀请国际著名学者和刊物主编就学术提升与Academic paper writing进行专题讲座。

主题论坛：主要由特邀专家作主题报告，围绕油气能源、人工智能与未来科学发展、技术需求和人才培养等开展前沿系列讲座。

专题研讨：围绕深层油气、非常规油气及其他能源矿产等相关勘探理论、方法与技术开展学术交流。

Academic paper writing:开放讲习班,分享在高水平国际期刊上发表学术论文的要求和心得, 同时推动研究生更好地了解学科国际前沿,开展专业学习和科研工作。

Field study:参观深层油气重点实验室和山东省油气藏重点实验室,进行黄岛海岸地质实习考察。

We welcome outstanding doctoral and master's students
from China and abroad to participate.

I. Conference

Theme

油气•智能 @未来科学家

二、会议组织

主办单位：山东省教育厅 承办单位：China University of Petroleum (East China)

三、会议内容

1、油气+智能专家特邀报告；
2、油气地质与地球物理学术研讨；
3、论文写作研讨；4、实践考察。

四、会议组织结构

【学术委员会】

主任：郝芳副主任：操应长成员：唐晓明 刘可禹 蒋有录 符力耘 林承焰 刘华 胡钦红 印兴耀 卢双舫 范宜仁 韩同城 宗兆云 黄建平 王民 孟庆峰

【指导委员会】

主任：刘华东 副主任：阎子峰 成员：王备战 刘华 裴仰文 俞继仙 蔡宝平 邓少贵 宗兆云 张广智 吴智平 郑珊珊 曹丹平 李福来

【组织委员会】

主任：刘华 副主任：邓少贵 宗兆云 郑珊珊 张锋 成员：邱隆伟 张立强 李振春 王民 谭宝海 王力禾 李勇 邹桂红 杨建敏 栗磊 姜永昶 秘书：李勇 邹桂红

五、会议安排

1、会议时间:2021年11月2日至5日(11月2日为报到时间)

2、会议地点:China University of Petroleum (East China) 唐岛湾校区 3、会议交流语言:会议交流语言

六、会议注册、住宿安排及交通指南

1、会议注册费：本次论坛免收会议注册费。

2、食宿安排：本次会议凡投稿并被录用安排论坛交流人员，食宿由会务组统一安排，双人间标准。其中市内参会人员不提供住宿，参会其他费用请自行承担。

3、报名方式：本次论坛仅设现场交流发言，不设墙报展示。请参会代表于 2021年10月20日 前将英文论文全文和会议PPT发送至联系人邮箱 liyong@upc.edu.cn。截止日期前未收到PPT的，将不再安排现场交流。

4、优秀论文奖：本次论坛将设立优秀论文奖，请需要申报的人员务必同时将全英文论文发送至相应邮箱，否则视为放弃本次优秀论文评选。

5、疫情防控要求：根据疫情防控要求，请参会人员提前14天做好健康监测，并按照要求提供绿色健康码和14天行程单，按照要求进行核酸检测后才能进入校园参会。具体防疫要求将在3号通知内发布。

6、联系人:

李勇 0532-86981750 liyong@upc.edu.cn 邹桂红 0532-86981750 330556513@qq.com 谭宝海 18615328812 tanbaohai@upc.edu.cn 会议 QQ 交流群号:137467395,加群请注明学校、姓名



青岛校区: Huangdao District, QingdaoChangjiang West Road 66号 Postal code:266580 网址:http://www.upc.edu.cn/index.htm

附件 1

2021 年“油气•智能 @未来科学家”研究生国际学术论坛回执

单位			
参会人员姓名		参会人员身份	□博士、□硕士
通信地址			
联系电话		电子邮件	
提交会议报告题目（中英文）			
对会议安排与议题**的建议**			

此回执复印有效

2021年国际研究生“油气•智能@未来科学家”学术论坛

能源在国民经济和社会发展中发挥着重要作用。人工智能和大数据分析是推动深层—超深层及非常规油气藏未来勘探开发的两项新兴且必不可少的技术。如何以更高效率和更智能的方式勘探开发复杂油气藏，正日益受到业界和科研领域的关注。为提升研究生的学术研究与创新能力，并搭建国际学术交流平台，山东省“未来科学家”国际研究生学术论坛将于2021年11月上旬在中国石油大学（华东）青岛校区举办。

本届国际研究生“未来科学家”学术论坛将以“油气、智能@未来科学家”为主题，充分利用中国石油大学（华东）地质资源与地质工程学科的优势资源，以及两个海外专家平台，包括“深层—超深层油气地球物理勘探”和“致密油气地质与勘探”。

届时将邀请国内外知名科学家作专题报告，介绍本学科的前沿动态和最新进展，拓展国际视野，了解世界最新成果，并搭建国际学术交流平台，供研究生共同研讨。本论坛将促进研究生与国内外知名专家之间的学术交流，提升研究生的科研能力。

本论坛设有两个主题：“油气 + 智能与未来”和“油气勘探”。届时将邀请知名学者和期刊编辑，就学术研究和论文写作作专题讲座。

主题论坛：受邀专家将围绕油气、人工智能、未来的科学发展、技术要求以及研究生教育等主题，开展系列高水平讲座。

专题研讨会：学术交流旨在探索与深层油气、非常规油气及其他能源矿产相关的理论方法与技术。

论文写作：组织学习小组，分享在高水平国际期刊发表学术论文的要求与经验。同时，帮助研究生了解世界学科领域的新知识，并开展专业学习和研究工作。

参观与地质野外考察：参观深层油气重点实验室、山东省油气藏重点实验室，并在黄岛海滨周边开展地质野外考察。

欢迎国内外优秀博士生和研究生参加本次学术论坛。

1. 会议主题

“油气• 智能 @未来科学家”

2.组织：

主办单位：山东省教育厅 承办单位：中国石油大学（华东）

3. 会议内容

1. 人工智能、油气能源专题讲座；2. 油气地质与《Geophysics》学术讨论；3. 论文写作讨论；4. 参观与野外考察。会议期间，将邀请国内外知名专家作相关学术报告。

4. 会议组织

学术委员会

主席：方浩

副主席：曹银昌

委员：Tang Xiaoming、Liu Keyu、Jiang Youlu、Fu Liyun、Lin Chengyan、Liu Hua、Hu Qinhong、Yin Xingyao、Lu Shuangfang、Fan Yiren、Han Tongcheng、Zong Zhaoyun、Huang Jianping、Wang Min、Meng Qingfeng

指导委员会

主席：Liu Huadong

副主席：Yan Zifeng

委员：Wang Beizhan、Liu Hua、Pei Yangwen、Yu Jixian、Cai Baoping、Deng Shaogui、Zong Zhaoyun、Zhang Guangzhi、Wu Zhiping、Zhen Shanshan、Cao Danping、Li Fulai

组织委员会

主席：Liu Hua

副主席：Deng Shaogui、Zong Zhaoyun、Zhen Shanshan、Zhang Feng

委员：Qiu Longwei、Zhang Liqiang、Li Zhenchun、Wang Min、Tan Baohai、Wang Lihe、Li Yong、Zou Guihong、Yang Jianmin、Li Lei、Jiang Yongchang 大会秘书：Li Yong、Zou Guihong

5. 会议安排

1. 会议时间：2021年11月2nd日至5th日（11月2nd 日报到）2. 会议地点：中国石油大学（华东），中国山东青岛3. 会议语言：英语

6. 会议注册与住宿

1.注册费：参加本次论坛免费。

2.住宿：会议将为来自其他城市的受邀参会者提供住宿。会议将为所有参与者提供免费午餐。

3.注册及全文：参与者须于10月前将完整英文论文及演示文稿提交至 liyong@upc.edu.cn。20th 2021。

4. 优秀论文奖：本次研讨会将为提交全文的作者颁发优秀论文奖。未按时提交完整英语论文的作者将被视为放弃此次机会。

5. 新冠肺炎防控要求：根据新冠肺炎防控规定，所有参会者须完成14天健康检查，并出示健康码和行程记录以供查验，方可参加本次会议。具体要求将于稍后公布。

6.会议联系人

Li Yong 0532-86981750 liyong@upc.edu.cn Zou Guihong 0532-86981750 330556513@qq.com Tan Baohai 18615328812 tanbaohai@upc.edu.cn

会议QQ群：137467395，请注明您的姓名和所在大学



中国石油大学（华东）2021年9th月

“油气• 智能@未来科学家”2021年国际研究生学术论坛报名表

大学			
参与者 Name		学生类型	□博士生 □硕士生
地址			
电话		电子邮件	
文章标题			
建议			

也可以提交此表格的副本。

OGIFS

Oil and Gas • Intelligence @Future Scientist

油气·智能@未来科学家

最佳论文奖 BEST PAPER AWARD

IS PRESENTED TO

Hussein Muhammed

For this paper entitled

The optimization of VTI media-pseudo-depth domain least-squares reverse-time migration

2021 International Academic Forum for Graduate Students of

"Oil and Gas • Intelligence @Future Scientist"

“油气与智能@未来科学家”

郭芳

President of China University of Petroleum

中国石油大学校长、中国科学院院士 2021

Academician of Chinese Academy of Sciences

November 4 2021