

# P-SV波和P-SH波非线性旅行时层析成像

黄光南\*<sup>①②③</sup> 邓居智<sup>①</sup> 李红星<sup>①</sup> 李泽林<sup>①</sup> 张华<sup>①</sup> 张一波<sup>④</sup>

(<sup>①</sup>东华理工大学核技术应用教育部工程研究中心,江西南昌 330013; <sup>②</sup>中国地质大学(武汉)地球内部多尺度成像湖北省重点实验室,湖北武汉 430074; <sup>③</sup>中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; <sup>④</sup>东方地球物理公司研究院,河北涿州 072750)

黄光南,邓居智,李红星,李泽林,张华,张一波. P-SV波和P-SH波非线性旅行时层析成像. 石油地球物理勘探, 2015, 50(6): 1127-1133.

**摘要** 结合各向异性介质转换波射线追踪算法、旅行时扰动方程和非线性共轭梯度算法,实现了P-SV波和P-SH波非线性旅行时层析成像。利用P-SV波和P-SH波对块状异常体模型进行非线性旅行时层析成像得到了两组不同的反演结果。这两种转换波反演所得弹性模量参数结果与真实模型接近,收敛效果较好,证明了P-SV波和P-SH波非线性旅行时层析成像方法的正确性。

**关键词** 各向异性介质 弹性模量参数 层析成像 非线性反演

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.06.013

## 1 引言

引起岩石和地层各向异性性质的主要因素有<sup>[1~3]</sup>:结构各向异性(如薄的层状结构)、地层方向应力引起的各向异性、岩性各向异性(如颗粒的定向排列)、岩石晶体定向排列引起的各向异性,以及岩石裂隙、裂缝引起的各向异性。在各向异性介质中地震体波有三类:P波、SV波和SH波,它们分别以自身的速度与相互垂直的极化方向进行传播<sup>[4]</sup>。纵波地震资料有利于地层结构的研究,横波和转换波地震资料有利于识别地层岩性、裂缝分布和储层流体等特征<sup>[5,6]</sup>。在含气地层内纵波速度变化较大,在纵波成像剖面中气层下方会出现旅行时下拉现象。由于横波速度变化相对较小,所以可以得到更准确的地下构造分布。在含裂缝地层内纵波垂直于裂缝传播,其速度减小较快,横波沿着裂缝骨架方向传播,其速度变化不大,所以应用横波研究含裂缝地层较为有利。利用不同转换波旅行时进行反演有利

于提高地下地质体的成像精度。刘洋等<sup>[7,8]</sup>指出多波多分量地震勘探和横波勘探对裂缝识别和各向异性研究具有优势,结合纵波和转换波勘探可以降低多解性,提高构造勘探、岩性勘探、裂缝勘探和油气藏识别的精度,是未来解决复杂油气藏勘探问题的有效手段。

目前关于转换波旅行时层析成像正成为研究的前沿问题,当上覆地层存在高速体(例如:高速盐丘构造)时,纵波会因为不能穿透高速体而无法对深部构造进行成像,Bohm等<sup>[9]</sup>利用复杂的转换波旅行时信息进行地震旅行时层析成像获取深部地层的速度信息;Huang等<sup>[10]</sup>结合反射波、折射波和转换波旅行时对地下地层的速度和界面进行层析成像得到了精度较高的速度模型;马昭军<sup>[11]</sup>在基于旅行时线性插值的地震射线追踪算法的基础上,利用纵波和转换波进行速度和Q值层析反演,模型试算结果表明速度和Q值异常得到了较好的成像效果;高磊等<sup>[12]</sup>利用转换波初至进行转换波剩余静校正,通过对简单模型的分析认为转换波初至拟合可以求取转

\* 江西省南昌市东华理工大学核技术应用教育部工程研究中心, 330013. Email: bobking2@126.com

本文于2014年7月23日收到,最终修改稿于2015年9月5日收到。

本研究受国家科技重大专项(2011ZX05024-001-02)、东华理工大学博士科研基金项目(DHBK2013212)、核技术应用教育部工程研究中心基金项目(HJSJYB2015-9)、国家自然科学基金项目(41504095, 41004048, 41104074, 41364004, 41304097 和 41404057)、中国地质大学(武汉)地球内部多尺度成像湖北省重点实验室基金(SMIL-2015-10)和国家科技支撑计划项目(2011BAB04B03)联合资助。

换波静校正量。针对各向异性介质,利用转换波资料求取各向异性参数的方法大多数是基于时距曲线方程或反射系数递推公式,Stewart<sup>[13]</sup>利用 P-SV 波的反射系数近似递推公式求取横波速度;马劲风等<sup>[14]</sup>推导了转换波反射系数递推公式用于求取转换波速度和纵横波速度比;于春玲等<sup>[15]</sup>利用 VTI 介质的转换波时距曲线方程求取转换波叠加速度;李录明等<sup>[16]</sup>对 P-SV 波时距曲线方程的变化规律做了分析,并利用时距曲线方程求取横波速度;魏修成等<sup>[17]</sup>利用 Zoeppritz 方程对理论模型和实际转换波资料进行反演得到了横波速度信息。

针对各向异性介质情形,以上求取各向异性介质参数都是基于转换波时距曲线方程或反射系数递推公式,这样求取的介质参数只能反应参数的纵向变化关系。地震旅行时层析成像的反演剖面能够同时反映参数随水平距离和深度方向的变化关系,结果更加直观,信息量更加丰富。本文将介绍各向异性 TI 介质转换波非线性旅行时层析成像方法,利用 P-SV 波和 P-SH 波对块状异常体模型进行弹性模量参数反演,以期获得两组不同的弹性模量参数反演结果,提高块状异常体模型的反演精度。

## 2 方法原理

### 2.1 P-SV 波和 P-SH 波射线追踪算法

如果已知射线路径,那么可以沿着射线路径利用线性积分计算旅行时,其表达式<sup>[18]</sup>为

$$\tau = \int_{R(x)} \frac{ds}{v_g^i(\mathbf{x}, \theta_0, \mathbf{r}^0)} \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

式中:  $ds = |d\mathbf{x}|$  是射线段的长度;  $\mathbf{x}$  是空间坐标向量;  $v_g^i(\mathbf{x}, \theta_0, \mathbf{r}^0)$  ( $i=1, 2, 3$  分别代表 P 波、SV 波和 SH 波) 是各向异性介质的群速度;  $\theta_0$  为对称轴倾角。因此旅行时计算需要确定各向异性介质模型的群速度  $v_g^i(\mathbf{x}, \theta_0, \mathbf{r}^0)$  与射线路径  $R(\mathbf{x})$ 。根据费马原理,射线路径  $R(\mathbf{x})$  是使式(1)积分不变 ( $\delta\tau=0$ ) 的一条轨迹,这意味着在空间位置  $\mathbf{x}_B$  处的旅行时可以表示为

$$\tau_B = \min \left\{ \int_{x_A}^{x_B} \frac{ds}{v_g^i(\mathbf{x}, \theta_0, \mathbf{r}^0)} \quad \mathbf{x}_A \in \Omega_B \right\} \quad (2)$$

式中:  $\Omega_B$  是模型内  $\mathbf{x}_B$  点的邻域;  $\mathbf{r}^0$  是射线从  $\mathbf{x}_A$  点到  $\mathbf{x}_B$  点的单位向量。式(2)为各向同性介质的射线追踪拓展至各向异性介质提供了可能性。可以明

显地看出这种扩展过程需要考虑到基于射线方向  $\mathbf{r}^0$  的群速度与搜索从  $\mathbf{x}_A$  点到  $\mathbf{x}_B$  点最小旅行时的有效方法。因此将 Nakanishi 等<sup>[19]</sup> 和 Moser<sup>[20]</sup> 提出的最短路径方法从各向同性介质扩展至各向异性介质。

在求取 P-SV 波和 P-SH 波的旅行时和射线路径时,需要分别从炮点与检波点开始进行两次射线追踪正演。当从炮点开始进行射线追踪时,利用 P 波的群速度  $v_g^i(\mathbf{x}, \theta_0, \mathbf{r}^0)$ ; 当从检波点开始进行射线追踪时,利用 SV 波或 SH 波的群速度  $v_g^i(\mathbf{x}, \theta_0, \mathbf{r}^0)$  ( $i=2, 3$ )。根据这种方案,每个界面对应的 P-SV 波和 P-SH 波的旅行时计算方法如下

$$\tau = \min \{ \tau_S(\mathbf{x}_{\text{int}}) + \tau_R(\mathbf{x}_{\text{int}}) \quad \mathbf{x}_{\text{int}} \in \Omega_{\text{int}} \quad (3)$$

式中:  $\tau_S(\mathbf{x}_{\text{int}})$  和  $\tau_R(\mathbf{x}_{\text{int}})$  分别是炮点和检波点到界面节点位置  $\mathbf{x}_{\text{int}}$  的初至旅行时值;  $\Omega_{\text{int}}$  代表界面节点集合。通过求取炮点和检波点到界面节点的最小旅行时可以得到 P-SV 波和 P-SH 波的旅行时。当所有检波点的最小旅行时计算完成之后,可以根据入射节点的序号,从检波点至炮点以反向追踪的形式,求取炮点与检波点之间的射线路径就可以得到 P-SV 波和 P-SH 波的射线路径。

### 2.2 各向异性介质旅行时扰动方程

Cervený<sup>[21]</sup> 推导出了各向异性介质旅行时扰动方程的表达式。很多学者根据该公式做了不同的修改,Zhou 等<sup>[22]</sup> 推导出了各向异性介质旅行时扰动方程的三种表达形式,其中最为简单的形式是旅行时扰动方程的相速度偏微分形式

$$\delta\tau = - \int_R \frac{1}{v_p^i v_g^i} \left( \frac{\partial v_p^i}{\partial m_v} \right) \delta m_v ds \quad (4)$$

式中:  $v_p^i$  是各向异性介质的相速度;以二维情形为例,  $m_v \in \{c_{11}, c_{13}, c_{33}, c_{44}, c_{66}, \theta_0\}$  代表模型各向异性介质参数;  $\frac{\partial v_p^i}{\partial m_v}$  是相速度对各向异性介质参数的偏微分表达式,该表达式被称为速度敏感函数,Zhou 等<sup>[23]</sup> 和黄光南等<sup>[24]</sup> 对速度敏感函数的计算方法做过详细研究。由于相速度和群速度是波前法向量  $\mathbf{n}$  和模型参数向量  $\mathbf{m}$  的函数,所以式(4)可以进一步写成

$$\delta\tau = - \int_R \frac{\delta m_v}{v_p^i(\mathbf{m}, \mathbf{n}) v_g^i(\mathbf{m}, \mathbf{n})} \frac{\partial v_p^i(\mathbf{m}, \mathbf{n})}{\partial m_v} ds \quad (5)$$

各向异性模型参数化后,可以得到相速度  $v_p^i(\mathbf{m}, \mathbf{n})$  与群速度  $v_g^i(\mathbf{m}, \mathbf{n})$  模型。

在进行各向异性介质旅行时层析成像时, 将区域  $\Omega$  划分成  $N_\Omega$  个小单元  $\partial\Omega_k (\Omega = \sum_{k=1}^{N_\Omega} \partial\Omega_k)$ , 式(5)可以写成分段求和的形式

$$\delta\tau = - \sum_{k=1}^{N_\Omega} \int_{R_k} \frac{\delta m_v}{v_p^i(\mathbf{m}, \mathbf{n}) v_g^i(\mathbf{m}, \mathbf{n})} \frac{\partial v_p^i(\mathbf{m}, \mathbf{n})}{\partial m_v} ds$$

$$\approx - \sum_{k=1}^{N_\Omega} \frac{R_k \delta m_v}{2} \left\{ \left[ \frac{1}{v_p^i(\mathbf{m}, \mathbf{n}) v_g^i(\mathbf{m}, \mathbf{n})} \frac{\partial v_p^i(\mathbf{m}, \mathbf{n})}{\partial m_v} \right] \Big|_{\mathbf{x}_A^{(k)}} + \left[ \frac{1}{v_p^i(\mathbf{m}, \mathbf{n}) v_g^i(\mathbf{m}, \mathbf{n})} \frac{\partial v_p^i(\mathbf{m}, \mathbf{n})}{\partial m_v} \right] \Big|_{\mathbf{x}_B^{(k)}} \right\} \quad (6)$$

式中:  $R_k$  是射线路径  $R$  在第  $k$  个单元  $\partial\Omega_k$  内的射线长度;  $\mathbf{x}_A^{(k)}$  和  $\mathbf{x}_B^{(k)}$  是射线段  $R_k$  两个端点的坐标。可以利用拉格朗日插值公式计算  $v_p^i$ ,  $v_g^i$  和  $\frac{\partial v_p^i}{\partial m_v}$  在射线段  $R_k$  两个端点的值<sup>[25]</sup>。

### 2.3 雅可比矩阵表达式

在实际情况下, 震源与检波器的数量非常大, 它们之间存在大量的“射线路径对”。如果将式(6)写成非线性反演的矩阵形式<sup>[22]</sup>, 那么它是一个大型的反演矩阵, 可以利用非线性共轭梯度算法对上式求解<sup>[26]</sup>。该矩阵方程的解为

$$\mathbf{m}_l = \mathbf{m}_{l-1} + Z_m [(J_l^T \mathbf{W}_d \mathbf{J}_l + \lambda \mathbf{W}_m)^{-g} \mathbf{J}_l^T \mathbf{W}_d \delta\tau_{l-1}]$$

$$l = 1, 2, \dots, L \quad (7)$$

式中:  $l$  为迭代次数; 上标“ $-g$ ”表示广义逆矩阵;  $\mathbf{W}_d$  和  $\mathbf{W}_m$  分别代表数据与模型参数的权重矩阵;  $\lambda$  是平衡数据拟合度与模型粗糙度之间的变量; 其他

变量的表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{m}_l = \{m_v^{(l)}(\mathbf{x}_K), K = 1, 2, \dots, M\} \\ \delta\tau_{l-1} = \{\tau_j^{\text{ob}} - \tau_j^{\text{syn}}(\mathbf{m}_{l-1}), j = 1, 2, \dots, N\} \\ Z_m(\mathbf{m}_l) = \{m_v^{(l)}, a_v \leq m_v^{(l)} \leq b_v\} \\ \mathbf{J}_l = \left[ \frac{\partial \tau_j}{\partial m_{vK}^{(l)}} \right]_{N \times M} \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $\mathbf{m}_l$  为第  $l$  次迭代反演的各向异性介质模型, 有  $M$  个节点值;  $\delta\tau_{l-1}$  为第  $l-1$  次迭代反演的旅行时残差,  $\tau_j^{\text{ob}}$  和  $\tau_j^{\text{syn}}(\mathbf{m}_{l-1})$  分别为第  $j$  条射线的观测旅行时和理论旅行时;  $Z_m(\mathbf{m}_l)$  是由每个各向异性参数  $m_v$  的上限  $a_v$  和下限  $b_v$  定义的约束算子;  $\mathbf{J}_l$  为雅可比矩阵, 具体表达式为

$$\frac{\partial \tau_j}{\partial m_{vK}^{(l)}} = - \sum_{k=1}^{N_\Omega} \frac{R_k}{2} \left[ \frac{1}{v_p^i(\mathbf{m}, \mathbf{n}) v_g^i(\mathbf{m}, \mathbf{n})} \frac{\partial v_p^i(\mathbf{m}, \mathbf{n})}{\partial m_v} \Big|_{\mathbf{m}_l, \mathbf{x}_{Aj}^{(k)}} + \frac{1}{v_p^i(\mathbf{m}, \mathbf{n}) v_g^i(\mathbf{m}, \mathbf{n})} \frac{\partial v_p^i(\mathbf{m}, \mathbf{n})}{\partial m_v} \Big|_{\mathbf{m}_l, \mathbf{x}_{Bj}^{(k)}} \right] \quad (9)$$

### 2.4 P-SV 波和 P-SH 波旅行时层析成像技术路线

根据各向异性介质转换波射线追踪算法、旅行时扰动方程和非线性共轭梯度算法, 设计了如图 1 所示的 P-SV 波和 P-SH 波旅行时层析成像技术路线。首先, 拾取 P-SV 波(或 P-SH 波)的观测旅行时; 然后, 参数化初始各向异性模型, 并执行射线追踪正演, 获取 P-SV 波(或 P-SH 波)的正演旅行时和射线路径; 计算观测旅行时与正演旅行时之间的

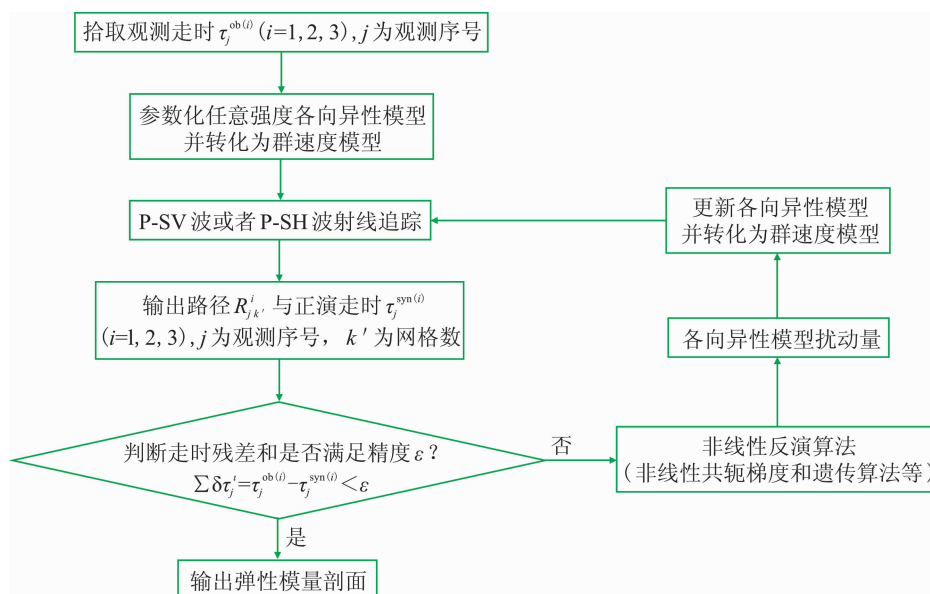


图 1 P-SV 波和 P-SH 波旅行时层析成像技术路线

旅行时残差和,并判断其是否满足给定的精度要求,如果满足精度要求,则输出弹性参数结果,如果不满足精度要求,则进行非线性反演求取各向异性模型的扰动量,并更新各向异性模型;最后,将更新后的各向异性模型作为新的输入,并执行下一轮射线追踪和旅行时残差和精度判断等。重复以上步骤,通过不断地迭代可以反演到满足精度要求的弹性模量参数。

### 3 数值模型

针对块状异常体模型,分别利用 P-SV 波和 P-SH 波进行非线性旅行时层析成像。各向异性介质块状异常体的横向尺度为 800m,纵向尺度为 400m;背景介质的弹性模量参数为:  $c_{11} = 12.0\text{GPa}$ ,  $c_{13} = 5.0\text{GPa}$ ,  $c_{33} = 10.0\text{GPa}$ ,  $c_{44} = 4.0\text{GPa}$ ,  $c_{66} = 6.0\text{GPa}$ , 对称轴倾角  $\theta_0 = 0^\circ$ 。块状异常体的弹性模量参数为:  $c_{11} = 20.0\text{GPa}$ ,  $c_{13} = 10.0\text{GPa}$ ,  $c_{33} = 15.0\text{GPa}$ ,  $c_{44} = 8.0\text{GPa}$ ,  $c_{66} = 12.0\text{GPa}$ , 对称轴倾角  $\theta_0 = 45^\circ$ 。采用地表激发和接收的观测方式,炮点与检波点位置重合,道间隔为 16m,炮点与检波点的个数均为 51 个,各个弹性模量参数模型的网格间距均为 50m。Zhou 等<sup>[18]</sup>指出,当地层对称轴倾角  $\theta_0$  不固定时,各向异性介质初至波旅行时层析成像很难反演得到合理的倾角分布。原因是相速度和正演旅行时都对地层对称轴倾角参数非常敏感,因此本文假设模型的对称轴倾角已知,只反演模型的弹性模量参数。为了改善旅行时层析成像的效果,设置了两个反射界面,第一个反射界面是块状异常体的上边界,第二个反射界面是模型的底界面,以增加模型的

观测旅行时信息和射线覆盖密度。本文数值模拟实验的观测旅行时是射线追踪得到的正演旅行时,并且添加了一定百分比的高斯噪声用以模拟实际观测旅行时数据。在数值计算时,  $\mathbf{W}_d$  和  $\mathbf{W}_m$  是根据数据和模型先验信息确定的权重矩阵,用以减小反演的多解性。文中假设先验信息的权重相同,即数据的权重矩阵和模型的权重矩阵均为单位矩阵。阻尼因子  $\lambda$  是通过多次数值测试,比较反演的收敛情况而选取。在反演迭代过程中,利用阿尔法中值滤波器剔除每次迭代结果的高波数噪声。数学反演算法是非线性共轭梯度法,是一种计算速度快、多次迭代逼近方法,Zhou 等<sup>[26]</sup>将其与不同反演算法做过数值模拟试验,证明了它是一种快速有效的反演算法。

#### 3.1 P-SV 波旅行时层析成像

在实现 P-SV 波旅行时层析成像时,将背景介质作为反演的初始模型用以反演块状异常体的弹性模量参数,有利于对块状异常体模型的重建。图 2 为块状异常体模型的 P-SV 波单炮射线路径分布,所有炮的射线分布覆盖了整个模型区域。经过多次迭代反演之后,得到了弹性模量参数剖面(图 3)。由各向异性介质的相速度表达式可知,P 波和 SV 波的相速度均与  $c_{66}$  无关,所以 P-SV 波旅行时层析成像只能反演出  $c_{11}$ 、 $c_{13}$ 、 $c_{33}$  和  $c_{44}$  四个参数。这里很难反演得到  $c_{13}$  参数的正确结果,只列出了  $c_{11}$ 、 $c_{33}$  和  $c_{44}$  参数的反演结果。由于迭代反演过程使用了平滑滤波器,所以反演参数的数值相比真实参数的数值稍小。从 P-SV 波旅行时迭代反演的收敛曲线(图 4)可知,正演旅行时数据与观测旅行时数据的拟合程度较好,表明弹性模量参数反演结果与真实模型比较接近。

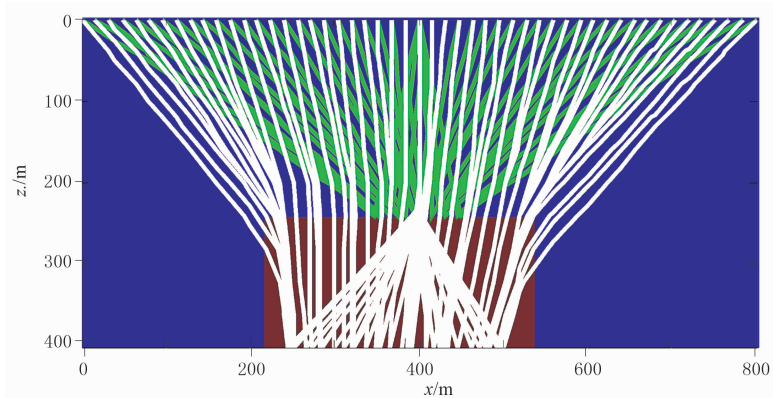


图 2 P-SV 波在块状异常体模型中的单炮射线路径

炮点位于坐标(400m,0),绿线为异常块体顶界面的反射路径,白线为模型底界面的反射路径

### 3.2 P-SH 波旅行时层析成像

在实现 P-SH 波旅行时层析成像时,将背景介质作为反演的初始模型用以反演块状异常体的弹性模量参数。图 5 为块状异常体模型的 P-SH 波射线

路径分布图,所有炮的射线分布覆盖了整个模型区域,有利于对块状异常体模型的重建。经过多次迭代反演之后,得到了弹性模量参数剖面(图 6)。由各向异性介质相速度的表达式可知,P波的相速度与

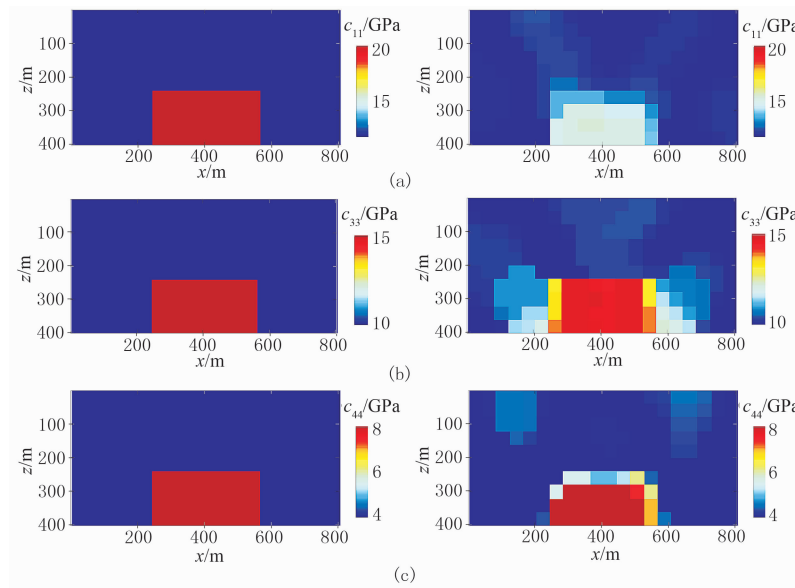


图 3 真实(左)与 P-SV 波反演(右)弹性参数剖面对比  
(a) $c_{11}$ ; (b) $c_{33}$ ; (c) $c_{44}$

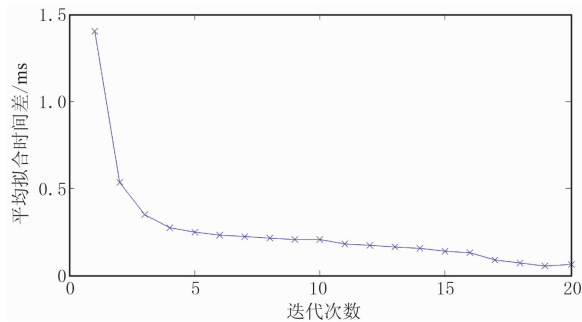


图 4 P-SV 波旅行时反演收敛曲线

$c_{11}$ 、 $c_{13}$ 、 $c_{33}$  和  $c_{44}$  有关,SH 波的相速度与  $c_{44}$  和  $c_{66}$  有关。从原理上,P-SH 波旅行时层析成像可以反演出五个弹性模量参数,但是文中只反演得到了四个弹性模量参数( $c_{11}$ 、 $c_{13}$ 、 $c_{33}$  和  $c_{44}$ )。由于迭代反演过程使用了平滑滤波器,所以反演参数剖面的数值相比真实参数剖面的数值稍小。从 P-SH 波旅行时迭代反演的收敛曲线(图 7)可知,正演旅行时数据与观测旅行时数据的拟合程度较好,表明弹性模量参数反演结果与真实模型之间比较接近。

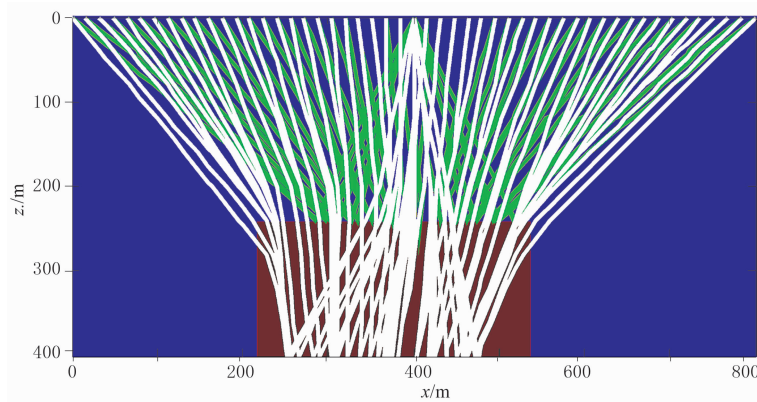


图 5 P-SH 波在块状异常体模型中的单炮射线路径

炮点位于坐标(400m,0),绿线为异常块体顶界面的反射路径,白线为模型底界面的反射路径

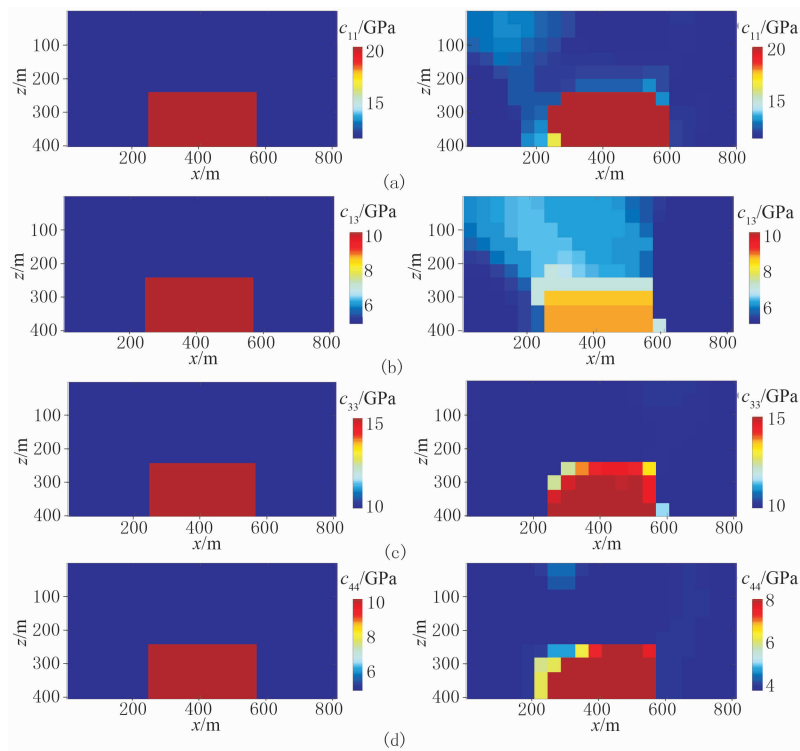


图6 真实(左)与 P-SH 波反演(右)弹性参数剖面对比

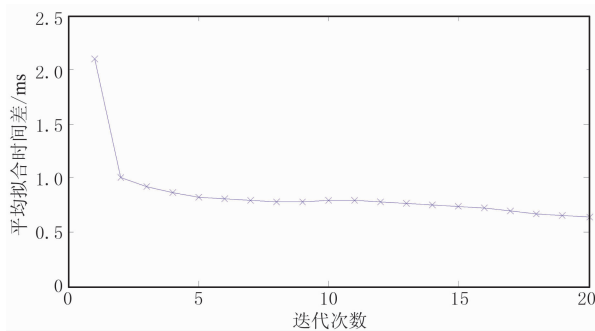
(a)  $c_{11}$ ; (b)  $c_{13}$ ; (c)  $c_{33}$ ; (d)  $c_{44}$ 

图7 P-SH 波旅行时反演收敛曲线

## 4 结论

本文结合各向异性介质 P-SV 波和 P-SH 波射线追踪算法、旅行时扰动方程和非线性共轭梯度算法实现了 P-SV 波和 P-SH 波非线性旅行时层析成像。分别利用 P-SV 波和 P-SH 波对块状异常体模型进行旅行时反演,并且得到了两组不同的反演结果。利用 P-SV 波旅行时反演得到了  $c_{11}$ 、 $c_{33}$  和  $c_{44}$  参数剖面,利用 P-SH 波旅行时反演得到了  $c_{11}$ 、 $c_{13}$ 、 $c_{33}$  和  $c_{44}$  参数剖面。这两种转换波的旅行时反演拟合曲线均得到了较好的收敛效果。转换波旅行时层析

成像的结果能够同时反映弹性模量参数随水平距离和地层深度方向的变化关系,结果更加直观,信息量更加丰富,从而有利于综合判断地下地质体的真实分布。

感谢阿拉伯联合酋长国阿布扎比石油学院周兵教授对本文给予的指导和帮助。

## 参考文献

- [1] Crampin S. Effective anisotropic elastic constants for wave-propagation through cracked solids. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1984, 76(1):135-145.
- [2] Helbig K. Systematic classification of layered-induced transverse isotropy. *Geophysical Prospecting*, 1981, 29(4):550-577.
- [3] 李芳,曹思远,姚健. 任意各向异性介质相(群)速度的计算. *地球物理学报*, 2012, 55(10):3420-3426. Li Fang, Cao Siyuan, Yao Jian. Calculation of phase and group velocities in an arbitrary anisotropic medium. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(10):3420-3426.
- [4] Zhou B and Greenhalgh S A. Raypath and travelttime computations for 2D transversely isotropic media with dipping symmetry axes. *Exploration Geophysics*, 2006, 37(2):150-159.
- [5] 黄光南,刘洋, Ari Tryggvason 等. 变网格间距速度

- 层析成像方法. 石油地球物理勘探, 2013, 48(3): 379-389.
- Huang Guangnan, Liu Yang, Ari Tryggvason et al. Variable grid spacing velocity tomography. OGP, 2013, 48(3): 379-389.
- [6] 唐晓雪, 唐建侯. 转换波资料研究储层各向异性. 石油地球物理勘探, 1997, 32(1): 27-33.
- Tang Xiaoxue, Tang Jianhou. Reservoir anisotropy analysis using P-SV wave data. OGP, 1997, 32(1): 27-33.
- [7] 刘洋, 魏修成. 转换波地震勘探的若干问题与对策. 勘探地球物理进展, 2003, 26(4): 247-267.
- Liu Yang, Wei Xiucheng. Some problems and strategies in converted wave seismic exploration. Progress in Exploration Geophysics, 2003, 26(4): 247-267.
- [8] 刘洋. 我国陆上转换波质量评价. 石油地球物理勘探, 2002, 37(2): 191-195.
- Liu Yang. Appreciation of land converted wave quality in China. OGP, 2002, 37(2): 191-195.
- [9] Bohm G, Rossi G and Vesnaver A. Tomography of converted waves for subhigh velocity layers targets using OBC data. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2002, 21: 846-849.
- [10] Huang G J, Bai C Y, Zhu D L et al. 2D/3D seismic simultaneous inversion for the velocity and interface geometry using multiple classes of arrivals. Bulletin of the Seismological Society of America, 2012, 102(2): 790-801.
- [11] 马昭军. 转换波衰减正、反演方法研究[学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2005.
- [12] 高磊, 潘树林, 周熙襄等. 利用转换波初至进行转换波剩余静校正. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(1): 130-133.
- Gao Lei, Pan Shulin, Zhou Xixiang et al. Using first break of converted wave to perform remaining static calibration. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(1): 130-133.
- [13] Stewart R R. Rapid map and inversion of P-SV waves. Geophysics, 1991, 56(6): 859-862.
- [14] 马劲风, 贾春环, 李庆春等. 转换波人工合成地震记录与速度反演方法研究. 石油地球物理勘探, 1999, 34(5): 509-519.
- Ma Jinfeng, Jia Chunhuan, Li Qingchun et al. Converted wave synthetic seismogram and its velocity inversion method. OGP, 1999, 34(5): 509-519.
- [15] 于春玲, 王建民, 付雷等. 转换波各向异性速度分析与偏移成像. 石油地球物理勘探, 2010, 45(增刊 1): 44-47.
- Yu Chunling, Wang Jianmin, Fu Lei et al. Anisotropic velocity analysis and migration imaging for converted wave. OGP, 2010, 45(S 1): 44-47.
- [16] 李录明, 罗省贤. P-SV 转换波速度分析及解释方法. 石油地球物理勘探, 1995, 30(1): 66-74.
- Li Luming and Luo Xingxian. Velocity analysis and interpretation of P-SV wave. OGP, 1995, 30(1): 66-74.
- [17] 魏修成, 王建民, 陈天胜. 转换波叠前横波速度反演. 地震学报, 2007, 29(2): 173-180.
- Wei Xiucheng, Wang Jianmin, Chen Tiansheng. Inversion of shear wave interval velocity on prestack converted wave data. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(2): 173-180.
- [18] Zhou B and Greenhalgh S A. 'Shortest path' ray tracing for the most general 2D/3D anisotropic media. Journal of Geophysics and Engineering, 2005, 2(1): 54-63.
- [19] Nakanishi I and Yamaguchi K. A numerical experiment on non-linear image reconstruction from first arrival times for two-dimensional island structure. Journal of Physics of the Earth, 1986, 34(4): 195-201.
- [20] Moser T J. Shortest path calculation of seismic rays. Geophysics, 1991, 56(1): 59-67.
- [21] Cerveny V. Seismic rays and ray intensities in inhomogeneous anisotropic media. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1972, 29(1): 1-13.
- [22] Zhou B and Greenhalgh S A. Non-linear traveltime inversion for 3-D seismic tomography in strongly anisotropic media. Geophysical Journal International, 2008, 172(1): 383-394.
- [23] Zhou B and Greenhalgh S A. Analytic expressions for the velocity sensitivity to the elastic moduli for the most general anisotropic media. Geophysical Prospecting, 2005, 53(4): 619-641.
- [24] 黄光南, 刘洋, 李红星等. TTI 介质相速度对弹性模量参数的敏感性研究. 石油物探, 2014, 53(3): 262-271.
- Huang Guangnan, Liu Yang, Li Hongxing et al. Research on sensitivity of phase velocity with respect to elastic moduli parameters in TTI media. GPP, 2014, 53(3): 262-271.
- [25] Kreyszig E. Advanced Engineering Mathematics. John Wiley & Sons Inc, 1993, 809-812.
- [26] Zhou B, Greenhalgh S A and Sinadinovski C. Iterative algorithms for the damped minimum norm, least squares and constraining problem in seismic tomography. Exploration Geophysics, 1992, 23(3): 497-505.

(本文编辑: 宜明理)

## 作者简介



黄光南 讲师, 博士, 1983 年生; 2006 年本科毕业于东华理工大学勘查技术与工程专业, 2009 年硕士毕业于中国海洋大学地球探测与信息技术专业, 2013 年博士毕业于中国石油大学(北京)地质资源与地质工程专业。现在东华理工大学核工程与地球物理学院主要从事地震走时层析成像和地震数据处理方法研究。