



谢万学, 梅安鑫, 陈丹, 等. 2026. 转换波地震成像技术在川南碳酸盐岩储层勘探中的应用及效果. 地球物理学进展, 41(1): 0341-0354, doi:10.6038/pg2026HH0336.

XIE WanXue, MEI AnXin, CHEN Dan, et al. 2026. Application and effect of converted wave seismic imaging technology in carbonate reservoir exploration in southern Sichuan. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(1): 0341-0354, doi:10.6038/pg2026HH0336.

转换波地震成像技术在川南碳酸盐岩储层勘探中的应用及效果

Application and effect of converted wave seismic imaging technology in carbonate reservoir exploration in southern Sichuan

谢万学^{1,3}, 梅安鑫², 陈丹^{1,3}, 王栋^{1,3}, 赵尧^{1,3}, 杨海涛^{1,3}, 李振^{1,3}, 刘鸿^{1,3}

XIE WanXue^{1,3}, MEI AnXin², CHEN Dan^{1,3}, WANG Dong^{1,3}, ZHAO Yao^{1,3}, YANG HaiTao^{1,3}, LI Zhen^{1,3}, LIU Hong^{1,3}

1. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司物探技术研究中心, 成都 610000

2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司苏里格项目经理部, 鄂尔多斯 017399

3. 中油油气勘探软件国家工程研究中心有限公司, 北京 100088

1. *Geophysical Exploration Technology Research Center of BGP, CNPC, Chengdu 610000, China*

2. *Sulige Project Department of Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., CNPC, Ordos 017399, China*

3. *CPNC Exploration Software Co., Ltd., Beijing 100088, China*

摘要 针对四川盆地某工区岩溶缝洞储层转换波资料信噪比低、静校正问题严重、成像困难的特点, 采用面波频散曲线反演法、共检波点叠加互相关法与非线性全局寻优法剩余静校正相组合的综合静校正方法, 有效解决了该地区转换波静校正问题; 采用转换波 VTI 介质各向异性叠前时间偏移技术, 通过建立精细的纵波、转换波偏移速度场及各向异性参数场模型, 绕射能量得到有效归位, 远炮检距道集被拉平, 提高了低信噪比地区转换波成像质量. 从最终纵波、转换波偏移成像剖面来看, 二者剖面波组特征对应清楚, 目的层成像清晰, 归位合理, 为储层气水识别与缝洞检测奠定了良好基础.

关键词 岩溶缝洞储层; 低信噪比; 转换波综合静校正; 转换波各向异性叠前时间偏移

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026HH0336

CSTR:32085.14.pg2026HH0336

Abstract A comprehensive statics technique for converted wave data was adopted effectively to solve the problems of low signal-to-noise ratio, serious statics and imaging difficulties in fractured carbonate reservoir in the study survey of southern Sichuan Basin. This statics technique combined the surface wave dispersion curves inversion, common-detection-point stacking and cross-correlating method and nonlinear global optimization method for residual statics together. The converted wave prestack time migration technique for VTI anisotropic medium was applied to solve the complex imaging problem, which was based on the establishment of migration velocity models and anisotropic parameter models for both PP and converted wave data. The processing results showed that the imaging quality of converted wave data with low signal to noise ratio was improved effectively, with the diffraction energy being focused, the far offset imaging gathers being flattened and the target layers being migrated accurately. The final two migration profiles of PP wave and converted wave data correlated with each other clearly with the consistent corresponding features, and the target layer is clearly imigrated, which built a good foundation for gas and water identification and fractured carbonate reservoir detection in the target formaton.

Keywords Fractured carbonate reservoir; Low signal to noise ratio; Comprehensive converted wave statics; Converted wave anisotropic prestack time migration

收稿日期 2024-12-13; 修回日期 2025-03-17.

投稿网址 <http://www.progeophysics.cn>

第一作者简介 谢万学, 男, 1981 年生, 2006 年毕业于中国石油大学(华东), 获地球探测与信息技术专业硕士学位, 现就职于东方地球物理勘探有限责任公司物探技术研究中心, 高级工程师, 主要从事多波多分量地震资料处理解释技术研究与应用工作.

E-mail: xiewanxue@163.com

0 引言

从理论而言,地震波场是弹性波场,既包含纵波,也包含横波.但在实际应用中,由于受到地震勘探技术和成本的限制,通常只利用了纵波波场.在地震勘探中,纵波勘探作为一种传统地震勘探方法,由于激发和接收方式简单、采集设计和施工成本较低、资料处理解释技术成熟,一直在国内外油气勘探领域发挥重要作用.随着经济的快速发展,全世界对石油天然气的消费需求越来越大,传统油气勘探技术面临油气储层类型越来越复杂、勘探成本逐步增加、开发难度逐步加大的困境.因此,多波多分量地震勘探技术越来越受到油气勘探行业的重视(李国发等,2005;董志刚,2016),正在成为解决复杂油气藏勘探开发的有效补充手段,也是油气勘探领域未来技术发展的主要趋势之一.

多波多分量地震勘探一般采用纵波震源激发、三分量检波器接收,能够采集到地下油气储层的全波场矢量信息,为精确描述地下地质体构造形态、精细裂缝预测、精细刻画油气藏空间分布提供了可能性.经过多年发展,多波多分量地震勘探的技术优势主要包括以下方面(张永刚等,2004;马昭军等,2010;孙歧峰和杜启振,2011):(1)对于气云区、碎屑岩致密气储层、碳酸盐岩储层、页岩油气储层等区域,纵波地震资料具有信噪比低、能量弱等特点,而转换波传播不易受地下流体的影响,利用转换波信息能够实现精确构造成像及储层刻画.(2)多波地震勘探资料波场信息丰富,可同时获得纵波、转换波等波场信息,除了可以精确提取纵波速度参数外,还可以更精确地获取横波速度参数,从而进一步提取准确的储层弹性参数,如泊松比、纵横波速度比、杨氏模量、脆性指数等,用来开展岩性预测、储层特征描述、流体识别及烃类检测工作.(3)转换横波资料信息对储层裂缝更加敏感,可以更好地利用横波分裂特性解决储层裂缝发育特征定量预测以及流体检测等难点问题.

四川盆地油气资源丰富,传统纵波勘探开发力度较大,同时开展多波多分量地震勘探的历史也较早(李忠等,2007).近年来,在致密砂岩气储层和碳酸盐岩缝洞型储层勘探领域,持续不断地开展了多波多分量地震勘探技术研究和推广应用(袁兵等,2023).自数字三分量检波器投入使用以来,经过多年的技术研究和勘探实践,采集及处理技术逐渐成熟,可以投入规模化生产应用,并取得了丰硕的技术成果.

本文针对四川盆地南部某工区岩溶缝洞储层埋藏深,转换波资料信噪比低、静校正问题严重、成像困难的特点,采用面波频散曲线反演法、共检波点叠加互相关法与非线性全局寻优法剩余静校正相组合的综合静校正方法,有效解决了该地区转换波静校正问题;针对各向异性严重,常规各向同性成像精度低,而转换波 VTI 多参数建模多解性强的实际问题特点,提出了转换波 VTI 介质各向异性四参数(V_c , γ_0 , γ_{eff} , χ_{eff})同时建模的叠前时间偏移技术,通过建立精细的纵波、转换波偏移速度场及各向异性参数场模型,绕射能量得到有效归位,远炮检距道集被拉平,提高了低信噪比地区转换波成像质量.

1 三维三分量地震资料采集

三维三分量(3D3C)地震资料采集是转换波数据处理、解释的基础.在当前行业技术现状中,三维三分量地震勘探一般采用纵波震源激发、三分量检波器接收的采集方式同时获得纵波、转换波地震资料.目前国内外行业通用的采集设计方案为,当同一个震源激发时,纵波、转换波在同一个观测排列片中接收.在三维三分量观测系统设计时,需要考虑转换波下行纵波和上行横波传播路径的非对称性特点,参考工区目的层埋藏深度和纵横波速度比大小,兼顾纵波共中心点(CMP)和转换波共转换点(CCP)分布特点,用同一个观测系统同时记录纵波、转换波地震数据,便于后续多波联合处理和联合对比解释研究工作.在该采集方案中,纵波和转换波具有相同的采样间隔和面元尺寸,但由于转换波射线路径的非对称性,二者的覆盖次数有所差异.图 1a、b 分别为本研究工区内纵波 CMP、转换波 CCP 面元覆盖次数分布图,从图中可以看出,纵波由于传播路径对称,CMP 覆盖参数相对比较均匀,转换波 CCP 覆盖次数差异相对较大,呈周期性空间分布特征.

2 面波反演法转换波静校正技术

转换波静校正包括炮点静校正和检波点静校正两个方面.其中,转换波炮点静校正求解相对简单,其炮点静校正量等于纵波炮点静校正量,转换波检波点静校正求解相对复杂困难得多.目前在石油地震勘探领域,常用的转换波静校正方法(郭桂红等,2003;杨海申等,2006;刘洋和魏修成,2008;杨军等,2019;高宪伟等,2020)有纵波静校正系数法、共检波点叠加静校正互相关法(唐建侯和张金山,1994;

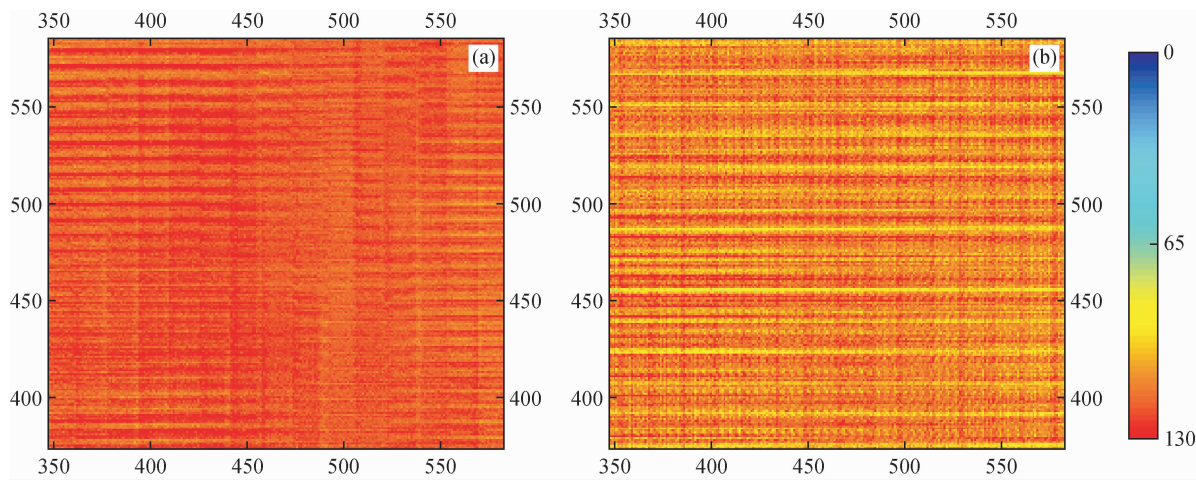


图 1 工区纵波、转换波观测系统面元覆盖次数对比
(a)纵波 CMP 覆盖次数;(b)转换波 CCP 覆盖次数.
Fig. 1 Comparison of fold cover distribution for PP and PS seismic acquisition geometry
(a) CMP fold of PP data; (b) CCP fold of PS data.

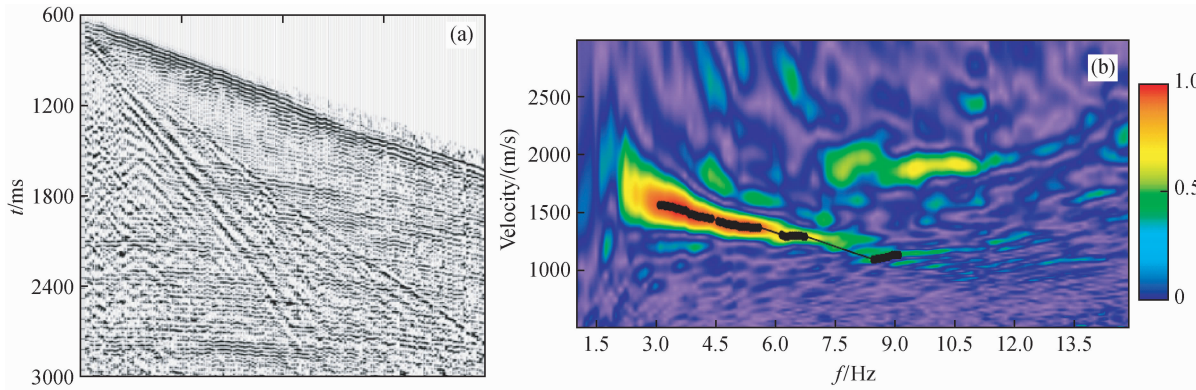


图 2 工区地震单炮及其互相关相移法频散谱成像结果
(a)地震单炮记录;(b)频散谱成像.
Fig. 2 Seismic shot record of survey and its surface wave dispersion spectrum by cross-correlation phase-shift method
(a) Seismic single shot record; (b) Dispersion spectrum imaging.

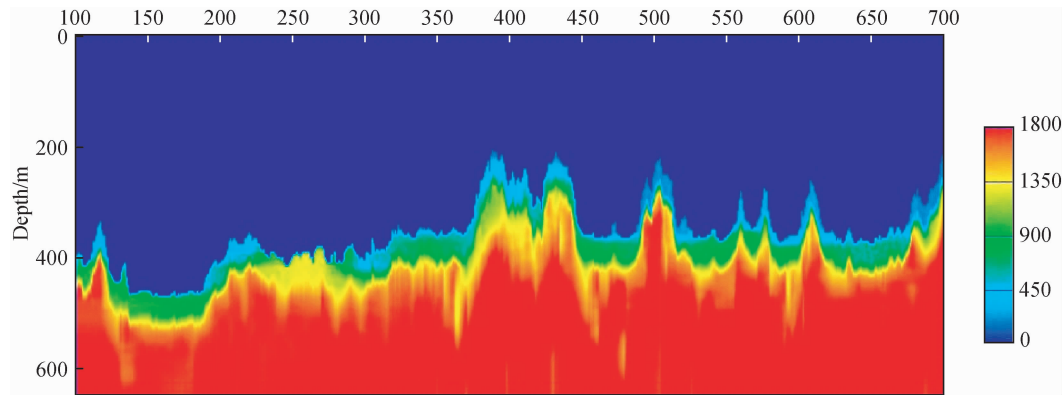


图 3 基于面波频散谱的近地表横波速度反演结果
Fig. 3 Near surface shear-wave velocity model based on surfave wave dispersion spectrum inversion

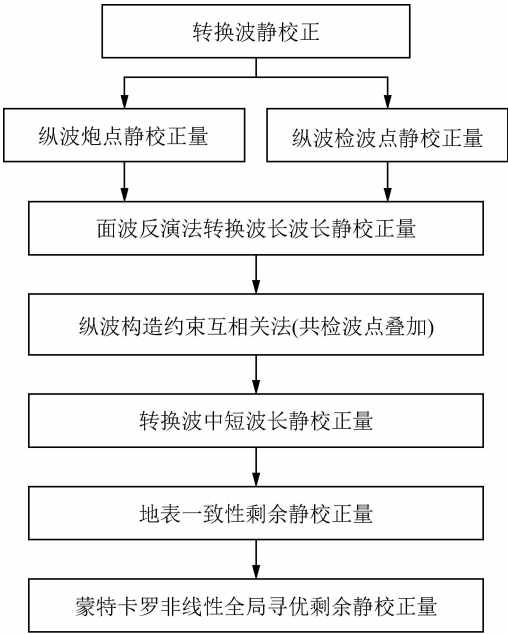


图4 转换波综合静校正技术流程

Fig.4 Thecombinedtechnique of converted-wave statics

Tessmer and Behle, 1988; Schafer, 1991; Cary and Eaton, 1993)、面波反演法(张华等, 2021)等. 其中面波反演法是近年来逐步推广应用的一种实用方法, 该方法由地震采集获得的炮集记录提取面波信息, 依据瑞雷面波的频散特性反演近地表横波速度结

构,进而获得工区近地表横波速度模型,从而获得转换波检波点静校正量,这就是面波反演法转换波静校正的实现过程. 面波反演法具有野外施工易操作、资料易获得、反演算法成熟等优点.

面波反演法包括两个重要方面,互相关相移法频散谱成像和基于面波频散谱的横波速度反演. 互相关相移法频散谱成像的基本思路是,对包含面波信息的野外采集地震记录相位角开展互相关扫描叠加处理,由于包含了全部地震道的面波相位差信息,相移法的计算性能得到增强,面波频散谱的成像精度得到提升.

对于面波频散谱反演,采用阻尼最小二乘法反演算法,利用瑞雷面波频散曲线可以获得工区近地表横波速度模型. 反演的目标函数可以简述为如下公式:

$$Q = \sum_{i=1}^k [S_i - M_i X]^2,$$

(1)

式中, i 为计算数据道序号, k 为计算数据最大个数, S_i 为野外采集资料提取的瑞雷面波频散曲线, X 为待反演的横波速度模型, M_i 为生成瑞雷面波频散曲线的正演算子.

工区近地表横波速度模型的阻尼最小二乘解为
$$X = (J^T J + \lambda I)^{-1} J^T (M^T M)^{-1} M^T S,$$
 (2) 式中, J 为目标函数的雅克比矩阵, J^T 为 J 的转置矩

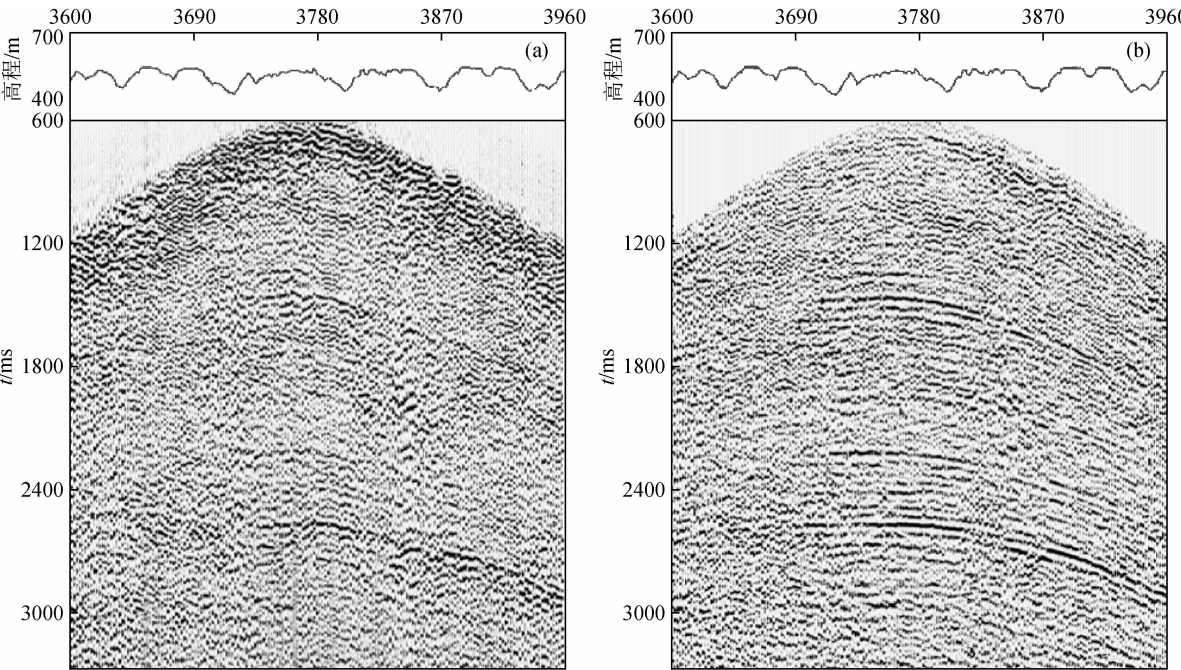


图5 转换波静校正前(a)、后(b)单炮对比展示

Fig.5 Display of shots before(a)and after(b) applying converted-wave statics

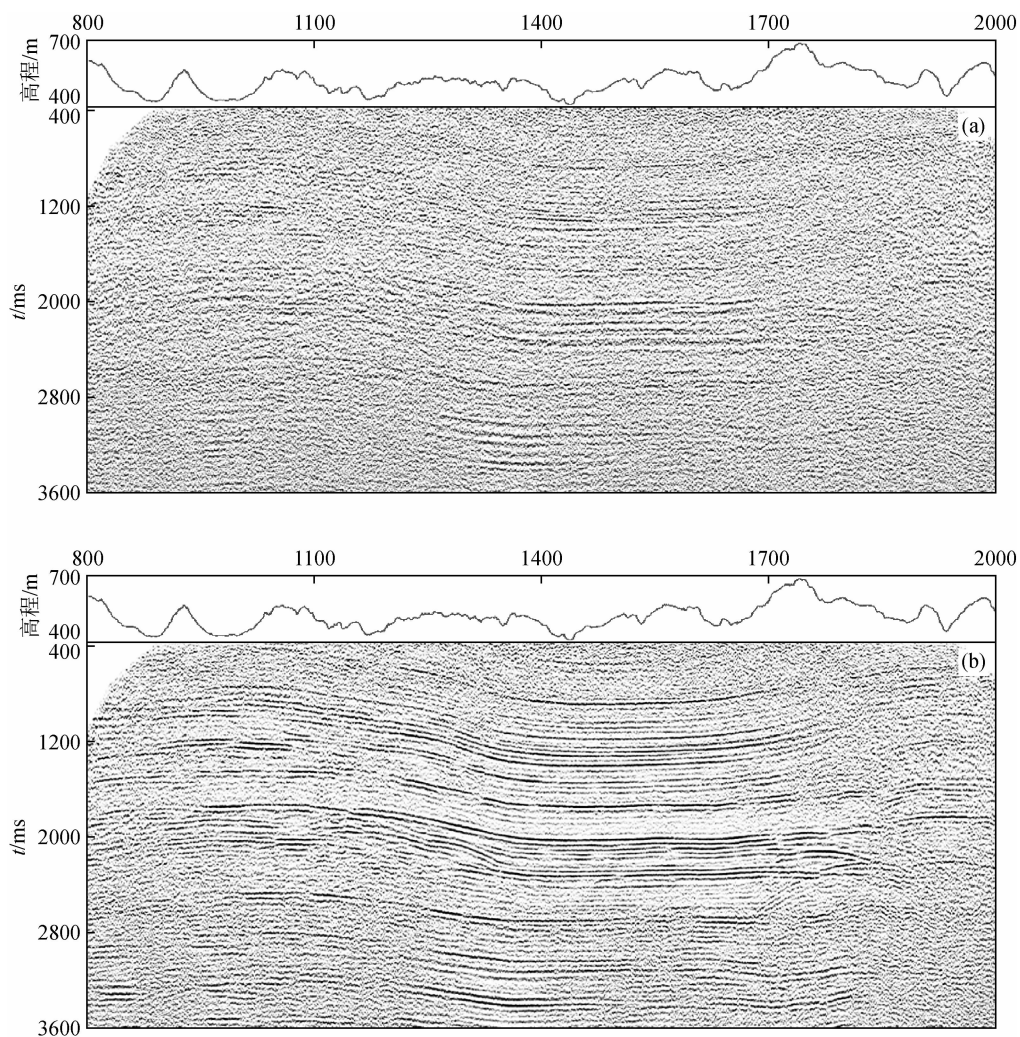


图 6 转换波静校正前(a)、后(b)叠加剖面对比展示

Fig. 6 Display of stacking profiles before(a) and after(b) applying converted-wave statics

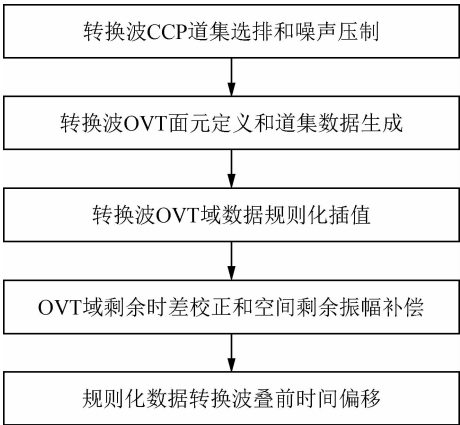


图 7 转换波 OVT 地震资料处理流程

Fig. 7 The OVT processing workflow for converted-wave data

阵, λ 为阻尼因子, I 为单位矩阵, M^T 为正演算子 M 的转置矩阵. 由公式(2)获得近地表横波速度模型后,即可快速计算出转换波检波点静校正量.

在该地震勘探工区中,选择与炮点偏移距不大于 30 m 的接收线排列,偏移距范围在 50 m 至 2500 m 范围内的地震道,进行面波信号提取. 图 2 为本工区地震单炮资料及其提取的互相关相移法面波频散谱成像结果. 对图 2b 中拾取的频散曲线利用公式(2)进行阻尼最小二乘法反演,获得单点横波速度反演结果. 然后在工区范围内对单点速度反演结果进行三维速度插值,可得到全工区近地表速度模型,图 3 展示的是工区某一测线位置基于面波频散谱反演的近地表横波速度剖面. 由图可见,该反演方法精细刻画了该工区近地表横波速度结构的横向变化,从而验证了该反演算法的可靠性.

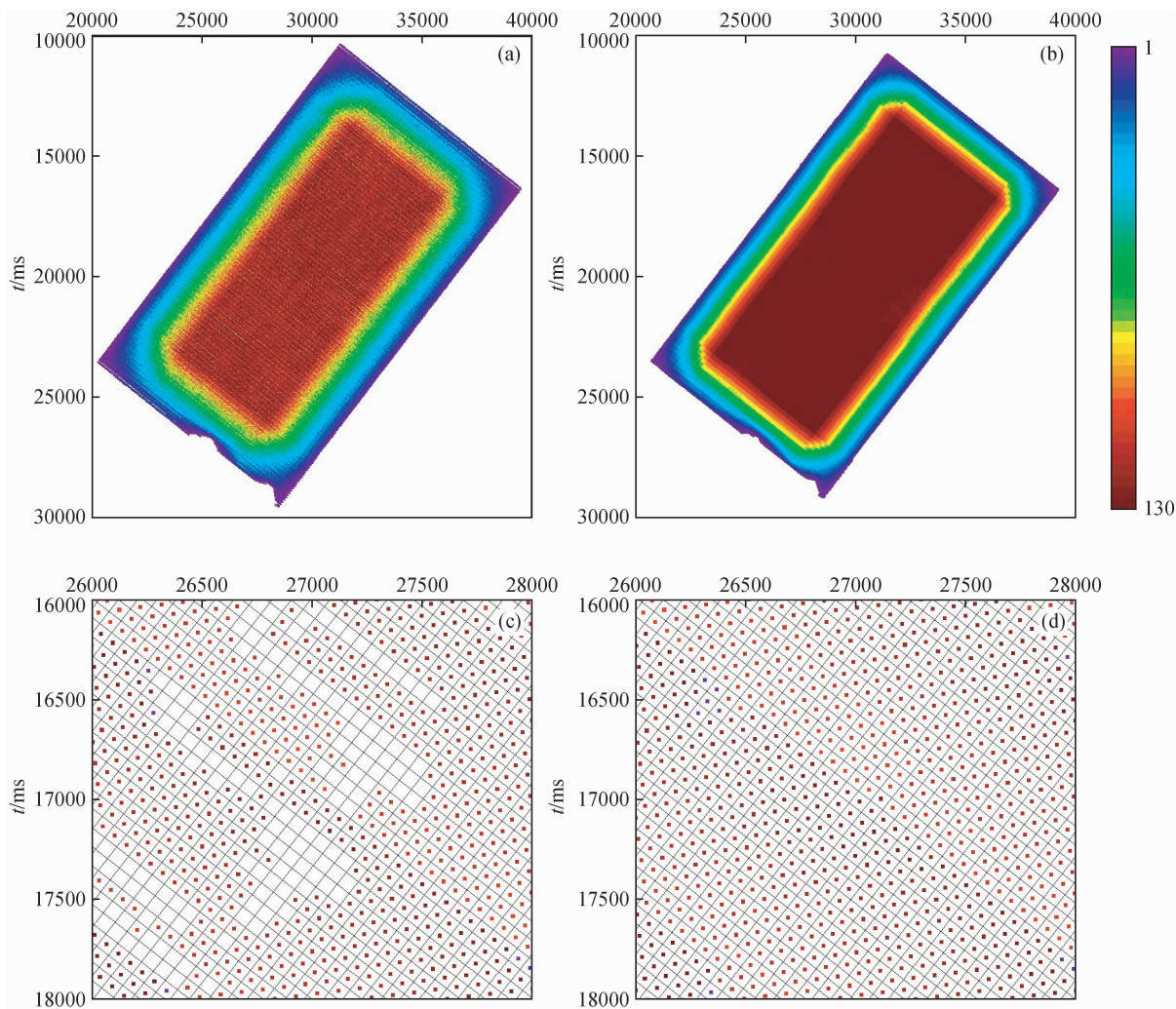


图 8 转换波 OVT 域炮检距向量片规则化前后效果图

(a) 原始数据覆盖次数; (b) OVT 域规则化后覆盖次数; (c) 规则化前面元反射点分布; (d) OVT 域规则化后面元反射点分布.

Fig. 8 Display of OVT bin distribution before and after applying regularization

(a) Fold cover of original data; (b) Fold cover of data after OVT regularization; (c) OVT bin distribution before regularization; (d) OVT bin distribution after regularization.

实际转换波资料的静校正处理流程如图 4 所示. 转换波炮点静校正量直接采用纵波炮点静校正量, 转换波检波点静校正量采用面波反演法计算, 即为转换波的长波长静校正量. 转换波的中短波长静校正量采用传统的纵波构造约束互相关法, 最后采用地表一致性剩余静校正计算方法和蒙特卡罗非线性全局寻优方法求解剩余静校正量问题. 采用该转换波静校正方法对工区三维三分量地震资料进行处理, 处理后单炮效果如图 5 所示. 如图 6 所示, 转换波静校正效果获得显著改善, 转换波叠加剖面同相轴连续性得到增强, 信噪比提升明显.

3 转换波 OVT 域处理技术

在地震勘探中, 宽方位地震资料一般采用 OVT (共偏移距向量片) 域处理. 虽然宽方位地震勘探相对传统勘探方式成本更昂贵, 由于宽方位地震资料不仅拥有更宽的方位角、最佳的地下照明度、更有利于压制多次波和偏移成像, 而且随着处理技术的进步, 宽方位地震资料能提供更丰富的地下储层各向异性信息和弹性参数信息, 宽方位地震勘探在陆上和海上地震勘探中应用得越来越普遍.

OVT 片是十字排列道集中某个 CMP 面元的一次覆盖. OVT 片的大小取决于野外观测系统中炮线

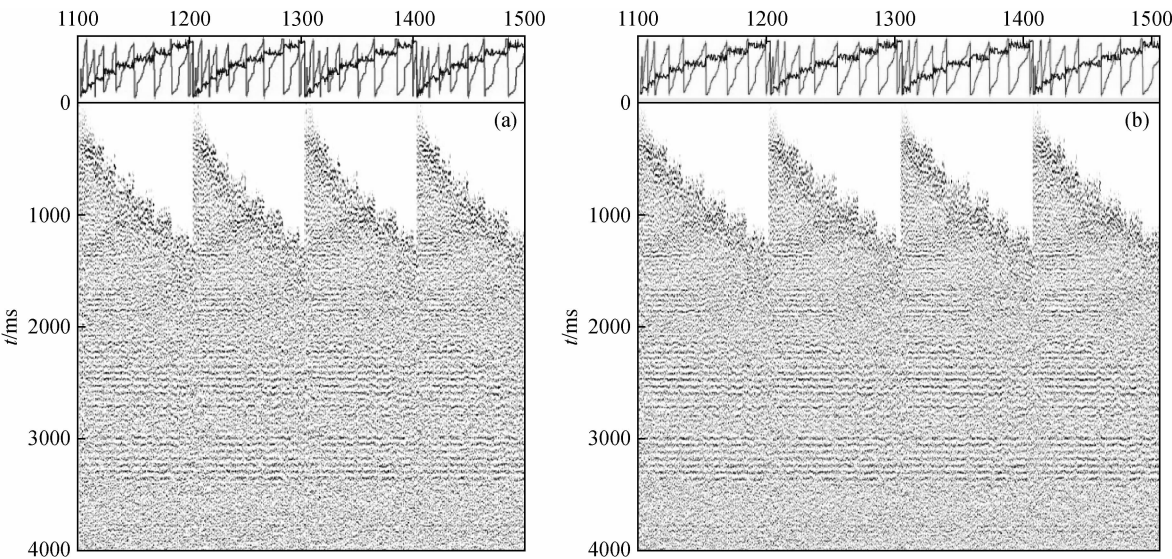


图9 规则化前、后转换波 OVT 域道集

(a)规则化前道集;(b)规则化后道集. 红线:方位角变化曲线;蓝线:偏移距变化曲线.

Fig.9 Display of OVT bin distribution before and after applying regularization

(a) Converted-wave gather before regularization;(b)Converted-wave gather after regularization.

The red line stands for the variation of azimuth and the blue line stands for the variation of offset.

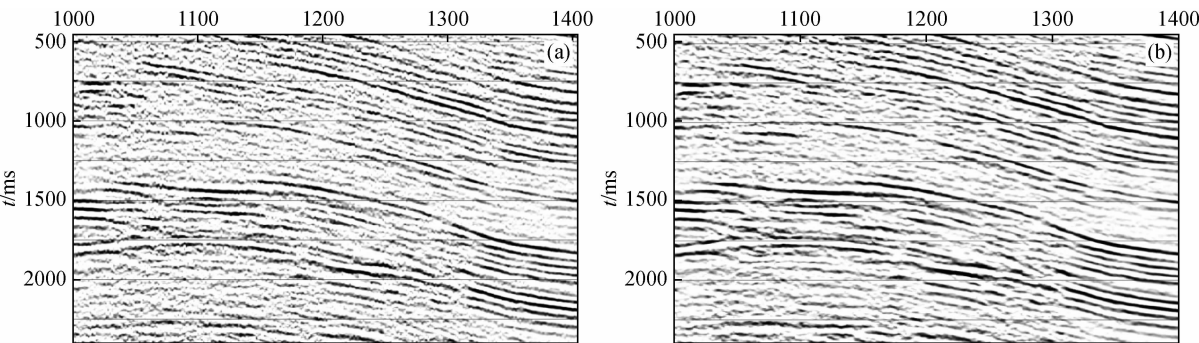


图10 转换波 OVT 域处理成像应用效果

(a)数据规则化前转换波成像剖面;(b)数据规则化后转换波成像剖面.

Fig.10 Display of converted-wave stacking before and after applying regularization

(a) Converted-wave stacking before regularization;(b)Converted-wave stacking after regularization.

距和接收线距的大小,一般而言,一个 OVT 矩形的长宽分别等于炮线距的两倍和检波线距的两倍.在整个三维工区中,一个 OVT 片的子集相当于工区中全部具有相同偏移距和方位角面元的一次覆盖数据体. OVT 处理的最大优势是处理过程中始终能够保留观测系统的激发-接收炮检距信息和方位角信息,有利于各向异性分析、裂缝预测和储层反演.

对于转换波 OVT 域面元定义方式而言,其与传统纵波 OVT 域面元划分的区别在于必须考虑纵横波速度比参数的影响.转换波 OVT 域面元定义公式

如下:

$$\text{BIN}_{\text{PS}_X} = \left(\frac{1 + \gamma}{\gamma} \right) \Delta S_{\text{LINE}}, \tag{3}$$
$$\text{BIN}_{\text{PS}_Y} = (1 + \gamma) \Delta R_{\text{LINE}}, \tag{4}$$

式中, BIN_{PS_X} 为转换波 OVT 域面元划分时 X 方向偏移距使用的分组大小, BIN_{PS_Y} 为转换波 OVT 域面元划分时 Y 方向偏移距使用的分组大小, γ 为纵横波速度比, ΔS_{LINE} 是野外采集观测系统中的炮线距大小, ΔR_{LINE} 是野外采集观测系统中的检波线距大小.

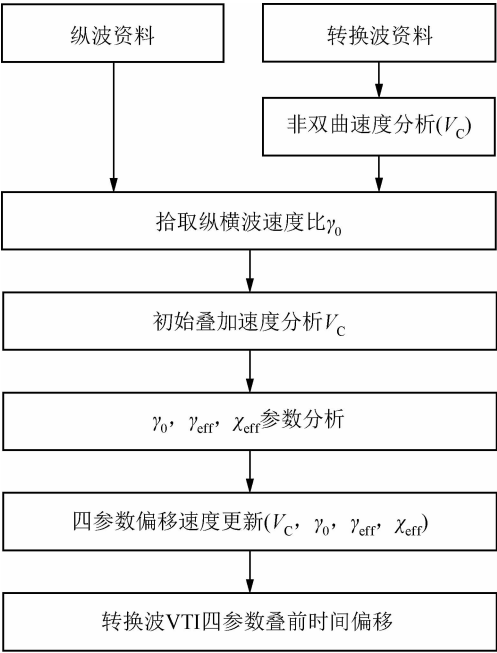


图 11 转换波 VTI 介质各向异性叠前时间偏移流程
Fig. 11 Thepre-stack migration workflow based on VTI media for converted-wave data

在实际转换波资料处理中,建立了一套基于转换波 OVT 域面元划分的完整地震资料处理流程(图 7).其处理步骤主要包括:数据预处理、转换波 OVT 域面元划分、数据规则化、道集去噪和剩余振幅补偿、OVT 域叠前偏移.

每一个 OVT 数据子集具有相同的方位角和偏移距信息,这样更有利于数据规则化处理.采用了先进的反假频规则化方法,通过高保真反假频傅里叶算法,在共偏移距域内对一定面元内所有道在 FK 域计算每道的内插因子并应用,然后输出.每一组偏

移距计算结果类似一次覆盖的叠加数据体,空面元得到填充,所有的偏移距组合并后可以变成一个与覆盖次数接近的叠前道集数据,达到规则化覆盖次数的目的.

采用转换波 OVT 域处理技术对地震数据进行去噪、规则化及方位各向异性校正处理,补齐数据空洞,均衡覆盖次数,成像质量得到明显改善.图 8 是叠前数据规则化前后单个 OVT 道集反射点位置分布图,可见规则化处理后,反射点位置更加规则和均匀,空洞位置得到插值填充.图 9 是规则化前、后转换波 OVT 域道集,规则化处理后,道集上的空道通过插值进行补充,并且插出的地震道不存在异常值,波形自然.图 10 是数据规则化处理前、后的转换波叠前时间偏移结果对比,可以看到规则化后的偏移数据浅层的信噪比更高,剖面上画弧的现象明显减少,横向能量更加一致. OVT 域数据处理后剖面的信噪比得到大幅提高,浅层及向斜两翼位置成像质量得到较大改善,茅口组层间弱反射成像更加清楚.

4 转换波 VTI 介质各向异性叠前时间偏移技术

在本工区资料处理中,转换波偏移采用是基于四参数 VTI 介质的各向异性叠前时间偏移技术(毕丽飞等,2007;黄中玉等,2009;边冬辉等,2017;孔选林,2021),方法原理详见附录 A,具体处理流程如图 11 所示.在该技术流程中,四参数分别为转换波等效速度 V_c ,垂直纵横波速度比 γ_0 ,纵横波等效速度比 γ_{eff} 以及与远偏移距信息相关的转换波各向异性参数 χ_{eff} .转换波四参数速度分析的技术流程为:通过纵横波叠加剖面层位拾取与匹配技术(杨哲

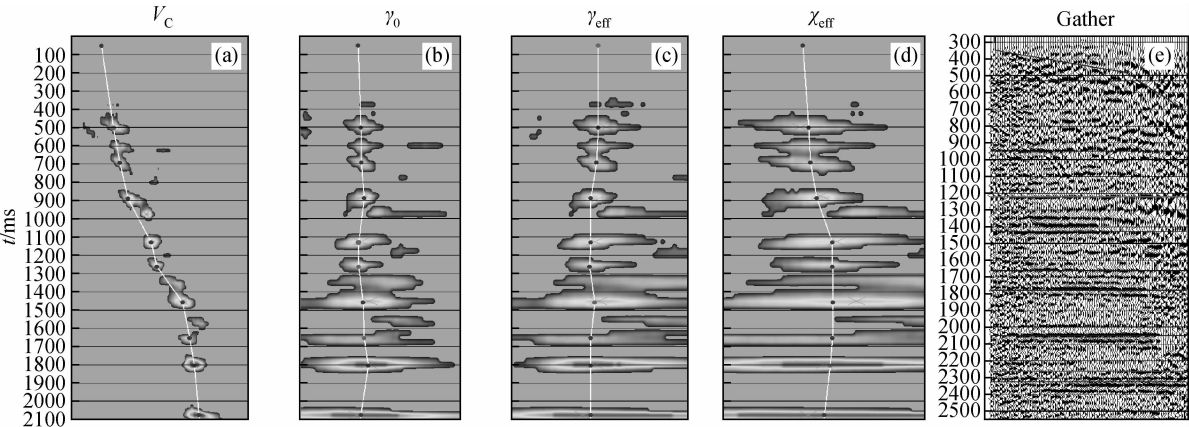


图 12 转换波 VTI 介质各向异性四参数谱分析
Fig. 12 Thefour migration parameters analysis based on VTI media for converted-wave data

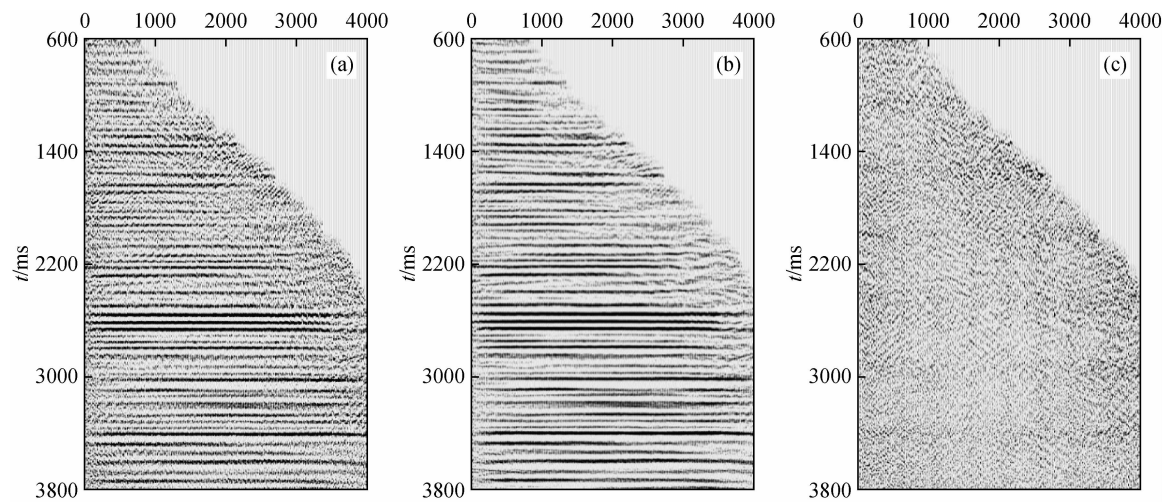


图 13 转换波道集去噪前后效果对比
(a) 去噪前;(b) 去噪后;(c) 噪声.

Fig. 13 Display of OVT trace gathering before and after denoising
(a) Converted-wave gather before denoising; (b) Converted-wave gather after denoising; (c) Noise gather.

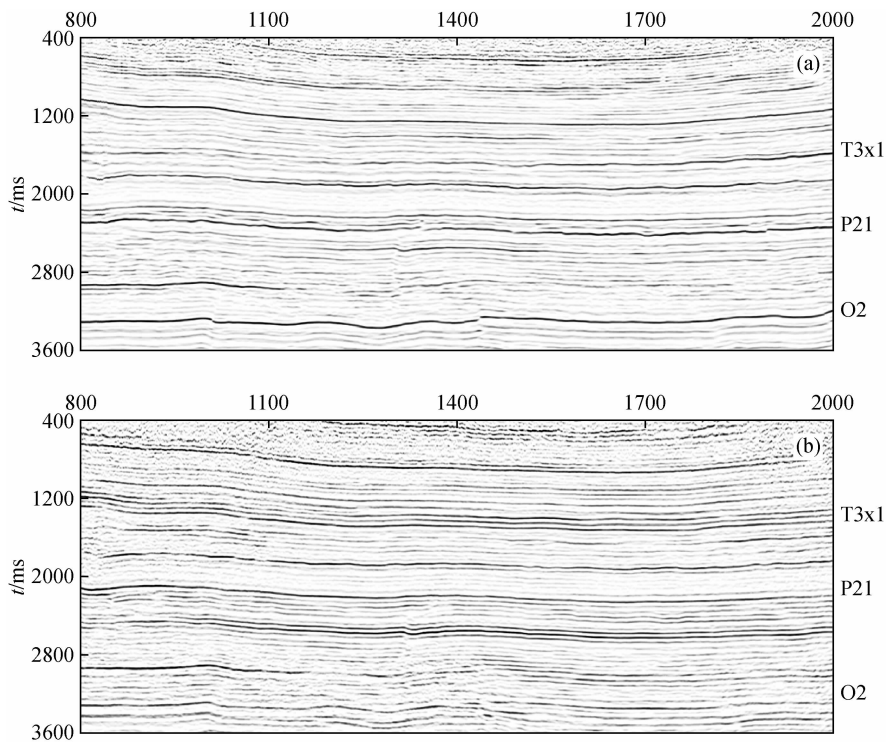


图 14 纵波与转换波叠前时间偏移剖面对比
(a)纵波叠前时间偏移;(b)转换波叠前时间偏移.

Fig. 14 Display of pre-stack time migration profiles for PP and converted-wave data
(a) PSTM profile for PP data; (b) PSTM profile for converted-wave data.

等,2018)获得垂直纵横波速度比 γ_0 ;通过三参数速度扫描分析($V_c, \gamma_0, \gamma_{\text{eff}}$)建立 V_c 速度场和纵横波等效速度比 γ_{eff} 场;通过远偏移距各向异性参数扫描建立转换波各向异性参数 χ_{eff} 场,其参数扫描过程如

图 12 所示.
在四参数模型建立之前,需要对转换波道集开展一系列预处理工作,包括转换波长波长静校正、地表一致性剩余静校正、OVT 域规则化处理(张丽艳

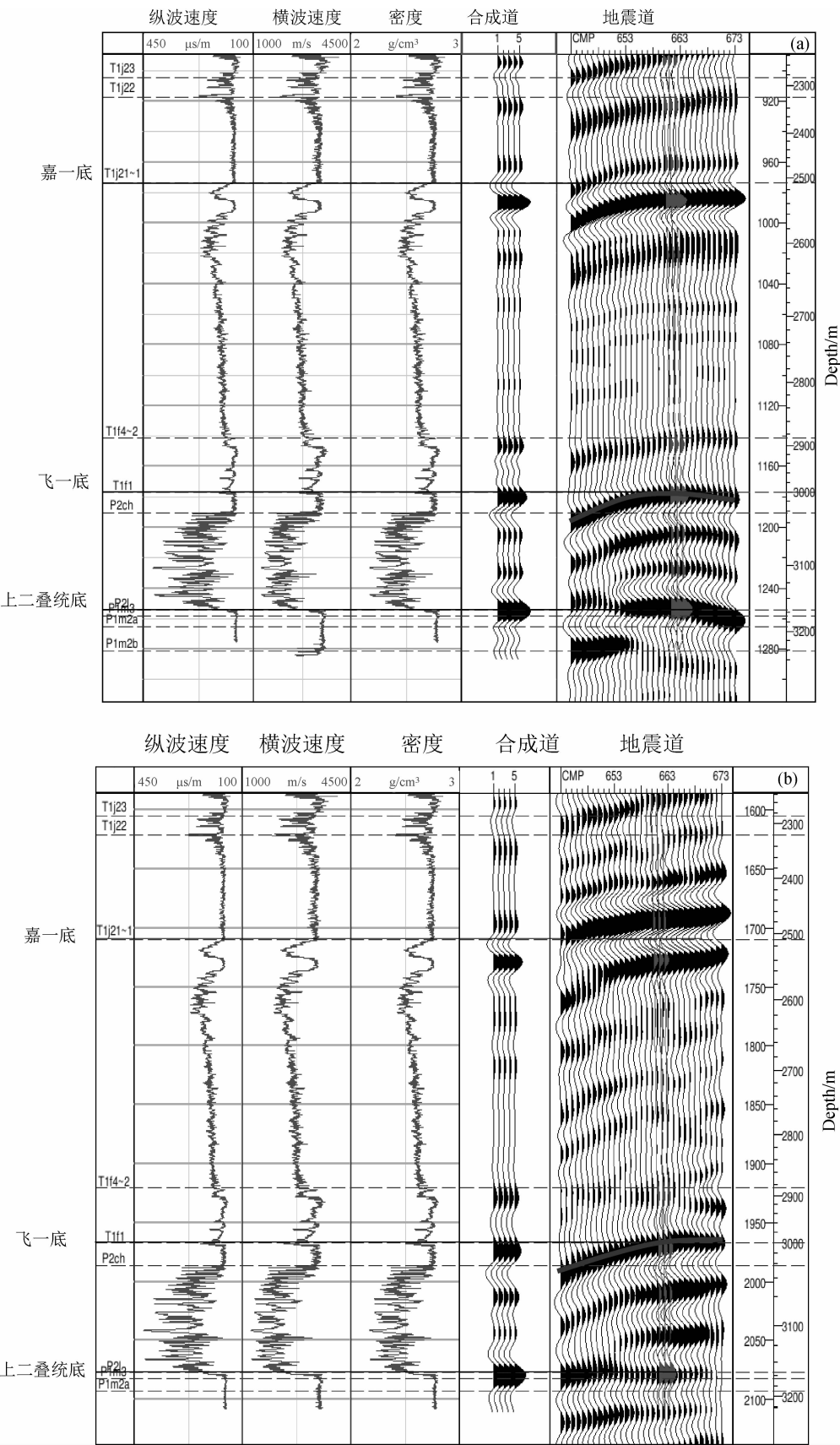


图 15 纵波、转换波合成记录与地震剖面标定图
(a) 纵波井震标定; (b) 转换波井震标定。
Fig. 15 Display of well to seismic calibration for PP and converted-wave data
(a) Well-seismic calibration for PP data; (b) Well-seismic calibration for converted-wave data.

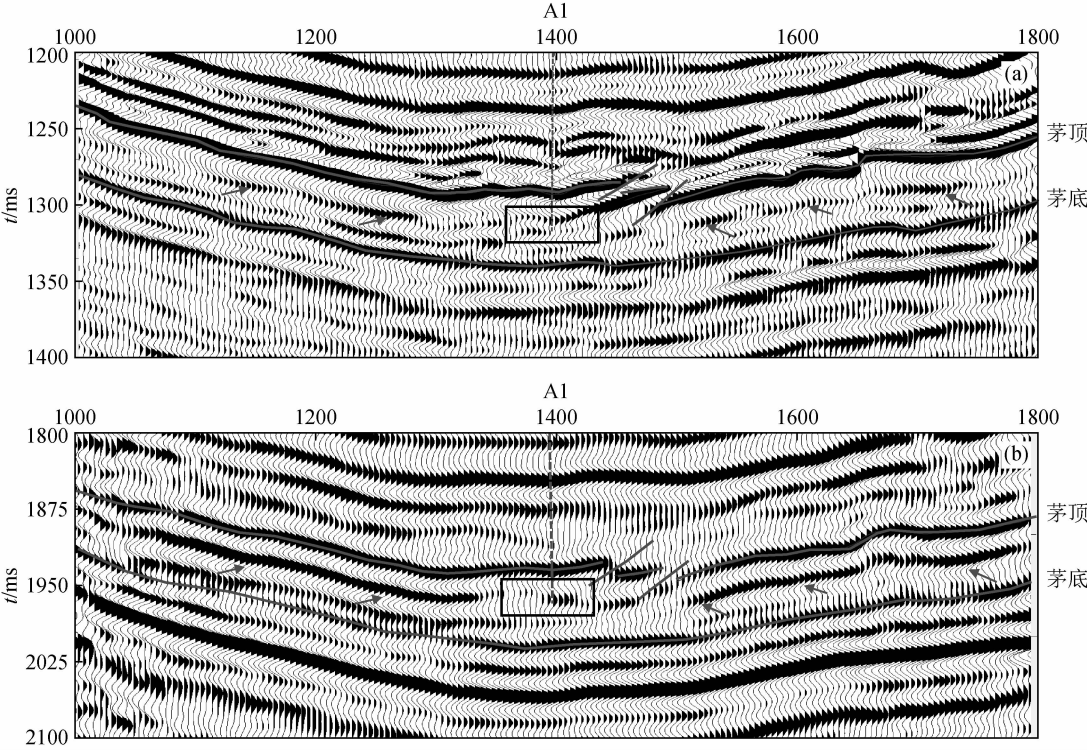


图 16 纵波、转换波剖面含气储层地震反射模式
(a)纵波地震反射特征;(b)转换波地震反射特征.

Fig. 16 Display of seismic reflection patterns of gas reservoirs in PP and converted wave profiles
(a) Seismic reflection characteristics for PP data;(b) Seismic reflection characteristics for converted-wave data.

和刘洋,2005;郭向宇等,2007;石建新等,2006;黄中玉等,2011). 同时,由于转换波资料信噪比一般较低,需要对道集开展去噪处理,去噪方法选择针对叠前道集的 cadzow 去噪技术(方法原理详见附录 B),可以有效提高道集信噪比,具体效果可见图 13. 去噪之后转换波道集品质大幅提升,这样更有利于四参数建模,能够加快后续迭代过程收敛速度.

采用基于四参数 VTI 介质的各向异性叠前时间偏移之后,转换波资料获得高品质的偏移成像结果,纵波、转换波偏移归位合理,波组关系对应性较好,目的层段反射特征清楚,资料信噪比高,为后续碳酸盐岩储存解释及缝洞雕刻奠定了良好的资料基础. 具体成像效果如图 14 所示.

5 岩溶缝洞储层应用效果

研究工区位于川东南中隆高陡构造区阳高寺构造群,地腹地质构造复杂,主要表现在二三叠系断裂较发育,尤以二叠系断层最为发育,褶皱强度大. 这种构造复杂性对地震勘探资料影响为侧面反射波、回转波及绕射波较多,时间剖面上各反射层之间时

间厚度横向变化大. 采用上述多波(纵波、转换波)地震关键成像技术后,本工区获得了高品质的多波勘探地震偏移成果,为后续多波解释及综合应用奠定了坚实资料基础. 与常规单一纵波资料解释相比,多波多分量综合解释更复杂、更具挑战性,其中多波层位对比和地震响应特征分析是关键内容.

多波层位标定是多波层位对比的基础. 其中,纵波采用常规的叠后合成记录进行标定,转换波通过叠前非零偏移距合成道集叠加的方式生成合成转换波合成记录进行标定. 图 15 是该工区过 A1 井的纵波、转换波井震标定情况,标定过程中利用了该井的纵波速度、横波速度及密度曲线. 从标定结果可以看出,纵波、转换波主要地质层位地震反射特征井震一致性较高.

在纵波、转换波地质层位标定的基础上,进一步开展多波层位对比及地震响应特征分析工作. 多波资料综合解释的主要工作就是多波层位对比,具体实施方式为,通过研究该地区主要目的层系的地质沉积特征和沉积规律,分析纵波、转换波地震反射强弱特征的差异,确定各自对应的地质层位,然后横向

对比追踪纵波、转换波对应的地质层位,在岩石物理建模的基础上,结合钻井、测井资料,对比分析二者在相同地质反射界面上不同的振幅响应特征,从而可以建立不同储层含流体特征的多波地震响应模式,获得基于多波资料联合解释的储层定性预测成果。

本轮多波地震勘探成果取得了很好的应用效果,在深层二叠系碳酸盐岩缝洞型储层取得高品质的纵波、转换波成像剖面。从图 16 过 A1 井的纵波、转换波地震成像剖面来看,本轮多波勘探地震偏移成果层间反射特征明显,断点清晰,绕射波场收敛合理,构造归位较好。由于地层对纵、横波场吸收衰减系数不同,纵波、转换波剖面的地质面貌和局部特征不完全相同,多波联合解释就是要分析出两种剖面的地质特征,更好地指导储层预测。A1 井测井资料显示含气储层厚度大于 20 m,由于含气储层对纵波、转换波场地震吸收衰减强度不同,纵波反射能量吸收衰减更严重,表现为中弱地震反射特征,转换波反射能量吸收衰减相对较弱,表现为中强地震反射特征,上述现象分别如图 16a、b 井口位置处蓝色方框所示。同时从井口位置向两翼横向延伸还可发现,在储层位置处,纵波地震反射特征整体偏弱、同相轴连续性较差、横向强弱变化较快;转换波地震反射特征整体偏强、同相轴连续性较好、横向强弱变化稳定,如图 16a、b 中红色箭头所示。基于上述分析过程,可以建立该地区纵波、转换波在碳酸盐岩缝洞型储层中的含气地震响应模式。

6 结论及展望

针对四川盆地某工区岩溶缝洞储层低信噪比转换波资料,依托现有处理技术,采用面波频散曲线反演法、共检波点叠加互相关法与非线性全局寻优法剩余静校正相组合的综合静校正方法,有效解决了该地区转换波静校正问题;采用转换波 VTI 介质各向异性叠前时间偏移技术,通过建立精细的纵波、转换波偏移速度场及各向异性参数场模型,绕射能量得到有效归位,远炮检距道集被拉平,提高了低信噪比地区转换波成像质量。从最终纵波、转换波偏移成像剖面来看,二者剖面波组特征对应清楚,目的层成像清晰,归位合理,为储层气水识别与缝洞检测奠定了良好基础。

多波地震勘探技术目前还处于持续发展完善中,目前尚存在一些需要升级完善的技术难题,需要在理论研究和实际应用中逐步攻克。随着“两宽一

高”地震采集技术的推广普及,3D3C 转换波处理技术还有待进一步提升,特别是在宽方位各向异性处理方面,目前还有很多问题需要研究解决,如转换波方位各向异性速度分析和时差校正技术,纵波、转换波联合层剥离深度域速度建模技术,弹性波全波场矢量成像技术等。同时,由于转换波资料信号主频较低,深层转换波信号存在分辨率不高、信噪比低的技术难题,因此 3D3C 转换波高分辨率处理技术也成为制约深层储层精细研究的瓶颈。在 3D3C 转换波资料解释中,可以充分发挥横波对各向异性特征更敏感、裂缝识别更有利的优势,在裂缝型储层预测中加大多波地震资料的应用力度。上述技术难题既是目前 3D3C 转换波地震勘探技术的研究重点,也必将成为多波多分量技术发展的趋势和方向。

附录 A 转换波 VTI 介质四参数各向异性叠前时间偏移技术

对于 VTI 各向异性介质,转换波双平方根叠前时间偏移走时方程采用如下公式:

$$T_c = \sqrt{\left(\frac{t_{c0}}{1 + \gamma_0}\right)^2 + \frac{(x + h)^2}{V_p^2} - 2\eta_{\text{eff}}\Delta t_p^2} + \sqrt{\left(\frac{\gamma_0 t_{c0}}{1 + \gamma_0}\right)^2 + \frac{(x - h)^2}{V_s^2} - 2\xi_{\text{eff}}\Delta t_s^2}, \quad (\text{A1})$$

其中, V_p 、 V_s 分别表示纵波、横波均方根速度, T_c 表示转换波总走时, t_{c0} 表示转换波双程走时, h 为转换点偏移量, η_{eff} 、 ξ_{eff} 分别表示纵波、横波各向异性参数, γ_0 表示平均纵横波速度比。

上述方程可以简化为 V_c 、 γ_0 、 γ_{eff} 、 χ_{eff} 四个参数,其简化过程为

$$V_p^2 = V_c^2 \frac{\gamma_{\text{eff}}(1 + \gamma_0)}{1 + \gamma_{\text{eff}}}, \quad (\text{A2})$$

$$V_s^2 = V_c^2 \frac{(1 + \gamma_0)}{\gamma_0(1 + \gamma_{\text{eff}})}, \quad (\text{A3})$$

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{\chi_{\text{eff}}}{\gamma_{\text{eff}}(\gamma_0 - 1)}, \quad (\text{A4})$$

$$\xi_{\text{eff}} = \frac{\chi_{\text{eff}}}{(\gamma_0 - 1)}, \quad (\text{A5})$$

上述简化方程中各个参数表示的物理意义为, V_c 表示反射点以上地层的转换波等效动校正速度, γ_0 表示纵横波垂直速度比, γ_{eff} 表示纵横波等效速度比, χ_{eff} 表示转换波等效各向异性系数。

附录 B Cadzow 去噪技术

Cadzow 去噪是一种随机噪声衰减方法。该方法

将时间域地震数据转换为频率域并建立混合 Cadzow 矩阵,然后基于地震道数据中随机噪声与有效信号在相干性方面的差异,对 Cadzow 矩阵进行奇异值分解,最后基于秩约化方法实现随机噪声衰减.对于地震采集数据 $d(x, y, t)$, x 表示 inline 方向, y 表示 crossline 方向, t 表示时间方向,沿时间方向对该地震数据进行傅里叶变换,得到复数域数据 $d(x, y, \omega)$,然后按照空间序列选择频率切片构建矩阵 B :

$$B = \begin{bmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & \cdots & d_{1,N_y} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & \cdots & d_{2,N_y} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N_x,1} & d_{N_x,2} & \cdots & d_{N_x,N_y} \end{bmatrix}, \quad (B1)$$

式中 $d_{i,j}$ 为第 i 条 inline、第 j 条 crossline 的样点振幅值.

通常利用横向频率切片数据构建 Hankel 嵌套矩阵,其对应的 Hankel 矩阵形式为

$$D = \begin{bmatrix} H_1 & H_2 & \cdots & H_{N_x-p+1} \\ H_2 & H_2 & \cdots & H_{N_x-p+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_p & H_{p+1} & \cdots & H_{N_x} \end{bmatrix}, \quad (B2)$$

其中:

$$H_i = \begin{bmatrix} d_{i,1} & d_{i,2} & \cdots & d_{i,N_y-q+1} \\ d_{i,2} & d_{i,3} & \cdots & d_{i,N_y-q+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{i,q} & d_{i,q+1} & \cdots & d_{i,N_y} \end{bmatrix}. \quad (B3)$$

通常, $p = N_x/2$, $q = N_y/2$,将 Hankel 嵌套矩阵分别沿 inline 方向和示 crossline 方向进行 Cadzow 滤波,从而增强有效地震信号的相干性.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Bi L F, Liu J P, Zhou Y H, *et al.* 2007. Four-parameter velocity analysis and its application to seismic data of Ken-71 area in Shengli Oilfield. *Journal of China University of Petroleum* (in Chinese), 31 (6): 34-39.

Bian D H, Wang X W, Yang W, *et al.* 2017. 3D converted wave imaging. *OGP* (in Chinese), 52(S2): 91-97.

Cary P W, Eaton D W S. 1993. A simple method for resolving large converted-wave (P-SV) statics. *Geophysics*, 58(3): 429-433.

Dong Z G. 2016. Application of multi-wave seismic prospecting technology in petroleum exploration. *China Petrochem* (in Chinese), (24): 18-19.

Gao X W, Gong T, Wang J Z, *et al.* 2020. Application research on

converted wave static correction techniques in the Longnusisi Area, Sichuan. //SPG/SEG Nanjing 2020 International Geophysical Conference (in Chinese). Nanjing, 480-483.

Guo G H, Wang D L, He Q D, *et al.* 2003. Statics of converted wave. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 33(4): 542-544, 554.

Guo X Y, Jiang X S, Zhu Z J. 2007. 3-component seismic data processing technique and application effects. *OGP* (in Chinese), 42 (1): 81-86.

Huang Z Y, Qu S L, Wang Y J, *et al.* 2009. Kirchhoff prestack time migration of PS-wave data for the layered anisotropic medium. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(12): 3109-3115, doi: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 12. 020.

Huang Z Y, Wang Y J, Liu W F, *et al.* 2011. Progress of the key techniques on 3D multi-component seismic data processing. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)* (in Chinese), 26(5): 23-29.

Kong X L. 2021. Research and application of key processing methods for land (mountain) three-dimensional multi-wave seismic data [Ph. D. thesis] (in Chinese). Chengdu: Chengdu University of Technology.

Li G F, Peng S P, He B S, *et al.* 2005. Key problems and solutions in processing converted-wave seismic data. *Journal of China University of Mining and Technology* (in Chinese), 34(1): 41-45.

Li Z, Li Y L, Wang H Y, *et al.* 2007. Research and progress on multi-wave and multi-component seismic exploration technology in Sichuan Basin. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 27 (Supplement A): 491-494.

Liu Y, Wei X C. 2008. Research on the propagation law of converted refracted waves and their application in converted wave static correction. *Science in China(D): Earth Science* (in Chinese), 38 (S1): 204-210.

Ma Z J, Tang J M, Xu T J. 2010. Progress on multi-wave and multi-component seismic exploration. *Progress in Exploration Geophysics* (in Chinese), 33(4): 247-253.

Schafer A W. 1991. Determination of converted-wave statics using P refractions together with SV refractions. //SEG Technical Program Expanded Abstracts. SEG, 1413-1415.

Shi J X, Wang Y G, Bi L F, *et al.* 2006. The process-interpretation technique of multi-component seismic data. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 21(2): 505-511.

Sun Q F, Du Q Z. 2011. A review of the multi-component seismic data processing. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 38(1): 67-73.

Tang J H, Zhang J S. 1994. A method for removing high static moveouts of P-SV waves. *OGP* (in Chinese), 29(5): 650-653.

Tessmer G, Behle A. 1988. Common reflection point data-stacking technique for converted waves. *Geophysical Prospecting*, 36(7): 671-688.

Yang H S, Li Y P, Chen H Q. 2006. P-SV converted wave static corrections by delay times. *OGP* (in Chinese), 41(1): 13-16.

Yang J, Luo W S, Yang H D, *et al.* 2019. Application of a comprehensive method for calculating converted wave static correction in Canadian oil sands exploration. //CGU Academic Annual Conference (in Chinese). Beijing, 890-892.

Yang Z, Wang X W, Bian D H, *et al.* 2018. Non-rigid automatic matching technology for converted wave and longitudinal wave layers under VSP constraints. //CPS/SEG Beijing International Geophysical Conference (in Chinese). Beijing, 1229-1232.

Yuan B, Zhao R R, Wang X Y, *et al.* 2023. Application of multi-wave and multi-component seismic acquisition technology for tight gas in the Sichuan Basin. //Proceedings of the 2023 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development II (in Chinese). Wuhan, 186-192.

Zhang H, Li L, Cao Z L, *et al.* 2021. Application of surface wave static correction technology in complex oil and gas exploration in the western region. //Proceedings of the 2021 Geophysical Exploration Technology Symposium of the Chinese Petroleum Society (in Chinese). Chengdu, 1273-1276.

Zhang L Y, Liu Y. 2005. Overview of prestack time migration for

converted wave. Progress in Geophysics (in Chinese), 20(4): 1134-1139.

Zhang Y G, Wang Y, Wang M Y. 2004. Some key problems in the multi-component seismic exploration. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 47(1): 151-155.

附中文参考文献

毕丽飞, 刘江平, 周永红, 等. 2007. 四参数速度分析法及其在垦71区三维转换波处理中的应用. 中国石油大学学报(自然科学版), 31(6): 34-39.

边冬辉, 王小卫, 杨维, 等. 2017. 三维转换波关键成像技术研究与应用. 石油地球物理勘探, 52(增刊2): 91-97.

董志刚. 2016. 多波地震勘探技术在石油勘探中的应用. 中国石油石化, (24): 18-19.

高宪伟, 公亭, 王家志, 等. 2020. 转换波静校正配套技术在四川龙女寺地区的应用研究. //SPG/SEG 南京 2020 年国际地球物理会议. 南京, 480-483.

郭桂红, 王德利, 何樵登, 等. 2003. 转换波的静校正. 吉林大学学报(地球科学版), 33(4): 542-544, 554.

郭向宇, 蒋小松, 朱志军. 2007. 三分量地震数据处理技术及应用效果. 石油地球物理勘探, 42(1): 81-86.

黄中玉, 曲寿利, 王于静, 等. 2009. 层状各向异性介质转换波克希霍夫叠前时间偏移. 地球物理学报, 52(12): 3109-3115, doi: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 12. 020.

黄中玉, 王于静, 刘伟峰, 等. 2011. 三维多分量资料处理关键技术进展. 西安石油大学学报(自然科学版), 26(5): 23-29.

孔选林. 2021. 陆地(山区)三维多波地震资料关键处理方法研究及应用[博士论文]. 成都: 成都理工大学.

李国发, 彭苏萍, 何兵寿, 等. 2005. 转换波地震资料处理的关键问题与解决方法. 中国矿业大学学报, 34(1): 41-45.

李忠, 李亚林, 王鸿燕, 等. 2007. 四川盆地多波多分量地震勘探技术研究进展. 天然气工业, 27(增刊A): 491-494.

刘洋, 魏修成. 2008. 转换型折射波传播规律及其在转换波静校正中的应用研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(S1): 204-210.

马昭军, 唐建明, 徐天吉. 2010. 多波多分量地震勘探技术研究进展. 勘探地球物理进展, 33(4): 247-253.

石建新, 王延光, 毕丽飞, 等. 2006. 多分量地震资料处理解释技术研究. 地球物理学进展, 21(2): 505-511.

孙歧峰, 杜启振. 2011. 多分量地震数据处理技术研究现状. 石油勘探与开发, 38(1): 67-73.

唐建侯, 张金山. 1994. 消除 P-SV 波大静校正量的方法. 石油地球物理勘探, 29(5): 650-653.

杨海申, 李彦鹏, 陈海青. 2006. 转换波延迟时静校正. 石油地球物理勘探, 41(1): 13-16.

杨军, 罗文山, 杨会东, 等. 2019. 一种计算转换波静校正量的综合方法在加拿大油砂勘探中的应用. //中国地球科学联合学术年会. 北京, 890-892.

杨哲, 王小卫, 边冬辉, 等. 2018. VSP 约束下转换波和纵波层位非刚性自动匹配技术. //CPS/SEG 北京 2018 国际地球物理会议. 北京, 1229-1232.

袁兵, 赵容容, 王晓阳, 等. 2023. 四川盆地致密气多波多分量地震采集技术应用实例. //2023 油气田勘探与开发国际会议论文集 II. 武汉, 186-192.

张华, 李乐, 曹中林, 等. 2021. 面波静校正技术在西部复杂油气勘探中的应用. //中国石油学会 2021 年物探技术研讨会论文集. 成都, 1273-1276.

张丽艳, 刘洋. 2005. 转换波叠前时间偏移方法综述. 地球物理学进展, 20(4): 1134-1139.

张永刚, 王赞, 王妙月. 2004. 目前多分量地震勘探中的几个关键问题. 地球物理学报, 47(1): 151-155.