2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2349-2360
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

鲁统祥,李列,李明,等.2026.北部湾盆地复杂断裂区地震采集处理一体化技术研究与应用.地球物理学进展,41(5):2349-2360,doi:10.6038/pg2026JJ0317.

LU TongXiang, LI Lie, LI Ming, *et al*. 2026. Research and application of integrated technologies for seismic acquisition and processing of complex fault zones in Beibuwan Basin. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2349-2360,doi:10.6038/pg2026JJ0317.

北部湾盆地复杂断裂区地震采集处理一体化技术研究与应用

Research and application of integrated technologies for seismic acquisition and processing of complex fault zones in Beibuwan Basin

鲁统祥[1],李列[1],李明[1],邓聪[1],周凡[1],陈磅[2],蒋亚洲[3]

LU TongXiang[1], LI Lie[1], LI Ming[1], DENG Cong[1], ZHOU Fan[1], CHEN Pang[2], JIANG YaZhou[3]

1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司,湛江 524057
2. 中海油田服务股份有限公司,天津 300459
3. 中海油田服务股份有限公司物探事业部物探研究院,湛江 524057
1. *Zhanjiang Branch, CNOOC Ltd., Zhanjiang* 524057, *China*
2. *China Oilfield Services Limited, Tianjin* 300459, *China*
3. *Institute of Geophysical Exploration Geophysical-China Oilfield Services Limited, Zhanjiang* 524057, *China*

摘 要 北部湾盆地油气资源丰富,但受复杂断裂发育影响,古近系涠洲组及流沙港组地震成像较差,制约深层圈闭精细落实.分析认为,拖缆采集方位窄、覆盖次数低、照明不均匀及各向异性速度模型精度低是该区复杂断裂成像差的关键原因.针对上述问题,以地震成像改善为导向,提出了以精细速度建模为基础的方位角-偏移距-覆盖次数等采集参数定量评估以及基于全波形反演速度建模的各向异性建模技术等,显著改善了北部湾盆地复杂断裂区地震资料品质,获得较好应用成效.

关键词 复杂断裂成像;采集处理一体化;采集参数定量评估;正交各向异性

中图分类号 P631,P738
文献标识码 A
doi:10.6038/pg2026JJ0317
CSTR:32085.14.pg2026JJ0317

Abstract The Beibuwan Basin is rich in oil and gas resources. However, due to the complex faults, the seismic imaging of the Weizhou Formation and Liushagang Formation in the Paleogene is poor, which restricts the precise implementation of deep traps. Analysis suggests that the key reasons for the poor imaging of complex faults in this area are the acquisition with narrow azimuth, low coverage fold, weak illumination, and processing difficulties with amplitude preservation denoising and characterizing rapid velocity changes. In order to resolve this difficulties, quantitative evaluation techniques for acquisition parameters with azimuth-offset-coverage is propoesd, and anisotropic migration imaging based on full waveform inversion velocity modeling are proposed for the OBN seismic data. The research significantly improved the quality of seismic data in the complex fault zones of Beibuwan Basin and achieved good application results.

Keywords Complex fracture imaging; Integrated acquisition and processing; Quantitative evaluation of seismic acquisition parameters; Orthotropy

收稿日期 2025-12-21; **修回日期** 2026-05-19. **投稿网址** http://www.progeophys.cn
基金项目 中国海洋石油有限公司综合科研"海上碳酸盐岩潜山油藏有利储层预测及开发关键技术"(KJZH-2025-2201)资助.
第一作者简介 鲁统祥,男,高级工程师,主要从事地震资料处理工作.E-mail:545867480@qq.com

0 引 言

北部湾盆地已发现多个大中型油田及含油构造,但该区因发育滑脱断裂、花状断裂、挤压及逆冲推覆等复杂构造,加之火成岩侵入屏蔽等(汪紫菱等,2022),面临南海西部最典型的复杂断裂区成像问题,地震资料品质差,制约该区深层勘探目标进一步精细评价.

复杂断裂区成像问题一直是地球物理研究热点问题,众多学者从采集或处理角度开展针对性研究.肖张波等(2021)基于深拖平缆双方位地震采集参数优化改善复杂构造区照明来改善古近系复杂构造成像;李列等(2019)、周静毅等(2022)等基于双方位地震速度建模及偏移成像融合处理改善复杂断裂区成像;何叶等(2024)基于数据驱动与地质模式约束的叠前深度偏移速度建模技术改善复杂构造区速度精度,进而改善地下构造的成像精度与准确性.类似地,针对北部湾盆地复杂断裂成像问题,先后开展了多轮次的三维拖缆、OBC 采集处理(采集参数见表 1),虽然复杂断裂区成像有一定改善,但始终无法完全解决,如图 1 所示,涠洲组花状断裂成像破碎,断面多解性强、断面夹持地层反射连续性差,且深层流二段地层反射较弱,难以开展精细层位解释工作,进而制约该区勘探精细评价.

表 1 北部湾盆地往年部分典型地震采集参数表

Table 1 Seismic acquisition parameters of Beibuwan Basin

采集年度	采集方式	观测系统	最大炮检距/m	缆间距/m	道间距/m	炮间距/m	覆盖次数
2003 年	三维拖缆	2 源 2 缆	4050	150	12.5	25	41
2018 年	三维拖缆	2 源 6 缆	6000	100	12.5	25	60
2012 年	OBC	Patch-8 缆	8800	400	25	25	192

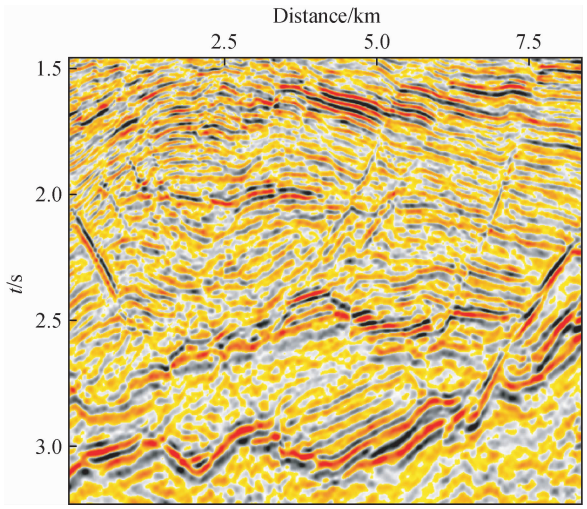


图 1 北部湾盆地典型地震剖面

Fig. 1 Typical seismic profile of Beibuwan Basin

针对上述问题,本文首先从复杂断裂区成像影响因素分析,认为针对性采集和处理一体化才是解决其成像的有效途径,进而开展采集方法研究确立 OBN 与高密度拖缆联合的立体地震采集方式,并开展针对性处理技术研究与应用,改善了靶区复杂断裂成像.

1 成像影响因素分析

复杂断裂区成像差的影响因素经分析主要有两点:

(1)复杂断裂会造成波场照明不足.复杂断裂区地震射线路径极不均匀,而常规拖缆地震采集方位较窄,较难完整接收地下反射信号,即原始地震采集信号存在不足.

(2)复杂断裂区速度横向变化剧烈,常规基于断层约束的网格层析速度反演方法所得速度精度有限,较难刻画小尺度断层周缘速度,从而造成偏移归位不准(王新领等,2019;郑浩等,2021);另外,复杂断裂往往伴随多方位走向断层,不同方位间存在较强的方位各向异性差异,常规基于 VTI/TTI 各向异性建模方法难以准确表征(李忠等,2022),而正交各向异性介质更符合地下介质假设(郭恺等,2019).

基于以上两点影响因素分析,认为解决复杂断裂成像需要从地震采集和处理两个方面进行综合研究:一方面针对拖缆采集照明不足问题开展方位拓宽优化采集论证,并且针对复杂断裂区速度反演所需要的偏移距信息充分论证,避免精细速度反演方法所需要的数据基础不满足情况,例如当前基于折射波的全波形反演(Full Waveform Inversion,FWI)

速度求取反演需要丰富的大偏移距和低频信息;另一方面,针对复杂断裂区常规层析反演速度精度低问题,开展基于 FWI 的正交各向异性建模技术研究,充分发挥新采集优势,改善地震资料品质.

2 采集参数定量评估

精细的数值模型是地震采集参数准确定量评估的基础. 复杂断裂区断层发育,断距大小不一,从 20 m 到 1000 m 不等,其中,超 500 m 断距的大尺度断层老资料成像相对准确,断层解释可靠性较高,但对 500 m 到 200 m 的中尺度断层及小于 200 m 的小尺度断层,受地震资料成像精度制约,断层解释可靠性较低,影响数值模型匹配精度,从而制约地震采集参数定量评估适配性.

针对该问题,本次采用基于断层质量因子评估的逐级嵌套精细数值建模技术,实现复杂断裂区精细建模. 首先,基于实际地震资料开展精细断层解释,在确定性较高的大尺度断层解释基础上,针对重点关注的花状断裂等中小尺度断层开展精细解释,并根据断点、断面成像清晰度等对断层进行质量因子赋值,范围 0 ~ 1,赋值越小,代表断层成像越不可靠,是后续需要重点关注解决的;其次,根据断层质量因子分段进行建模,本次根据断层质量因子 1 ~ 0.7、0.7 ~ 0.3、0.3 ~ 0 分为大、中、小三个断层尺度进行精细建模,在大尺度模型基础上基于 Kriging 插值法逐级嵌套中尺度和小尺度模型,实现三个尺度模型的平滑过渡,综合已钻井等信息约束,对中小尺度断层具有较高的建模精度,如图 2 所示.

Kriging 插值法的具体实现原理为,在空间点 x 处,假设区域变化量在 x 和 $x+h$ 的两个位置的振幅值分别为 $S(x)$ 和 $S(x+h)$,则在任意 x_i 点的变差函数可表示为:

$$\delta^*(h) = \frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[S(x_i) - S(x_i+h)]^2, \quad (1)$$

其中,$N(h)$ 为数据对 $[S(x), S(x+h)]$ 的组数,$\delta^*(h)$ 为变差函数.

在此变差函数基础上可构建插值函数:

$$S^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n}\lambda_i S(x_i)n, \quad (2)$$

其中,x_i 是已知散点数据,$S(x_i)$ 是该点的振幅值,n 为散点数据的个数,λ_i 是插值系数,$S^*(x_0)$ 是最终插值结果.

根据 Kriging 插值法的无偏性 $\delta_{ij}=\delta(h_{ij})=0$,对方差求解最小值,即理论上全部被插值点的实际值与估计值之差的方差最小时,插值最为准确,其方差可表示为:

$$\sigma^2 = E\left[(Z^*(x_0) - Z(x_0))^2\right]. \quad (3)$$

2.1 采集方向

对单一走向断层而言,地震采集方向与断层走向正交时最利于断层成像(鲁统祥,2024). 对本次研究靶区而言,整体大规模断层呈东西向,如图 3a、b 所示,当前资料对大规模断层成像已基本解决,确定性较高,但涉及到花状断层等小规模断层成像差、不确定性高,是采集亟待解决的问题. 基于当前地震资料成像可靠性对各断层进行质量因子赋值,并优选质量因子值较低的小尺度断层(本次取值 < 0.2)进行断层倾向统计,如图 3c 所

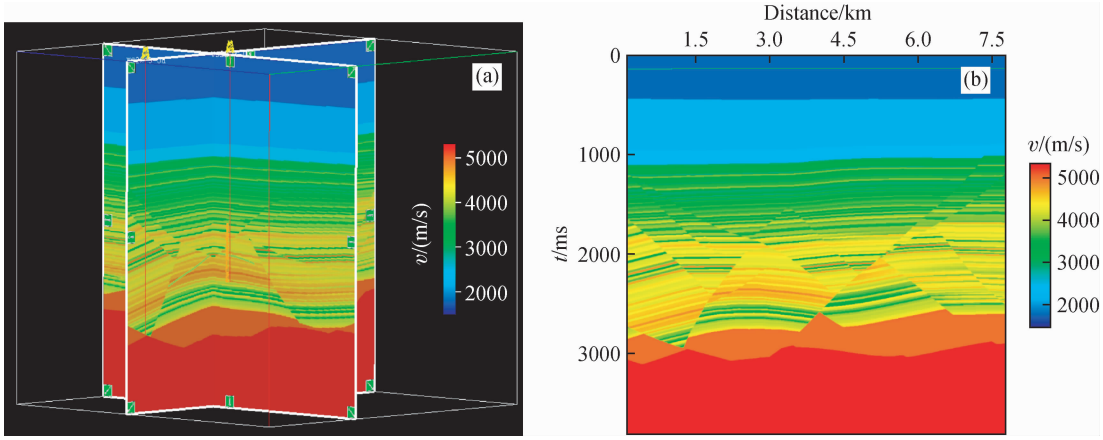


图 2 复杂断裂区速度模型示意图

(a)三维速度模型;(b)二维速度模型.

Fig. 2 Velocity model of complex fault zone

(a) The three dimension; (b) The two dimension.

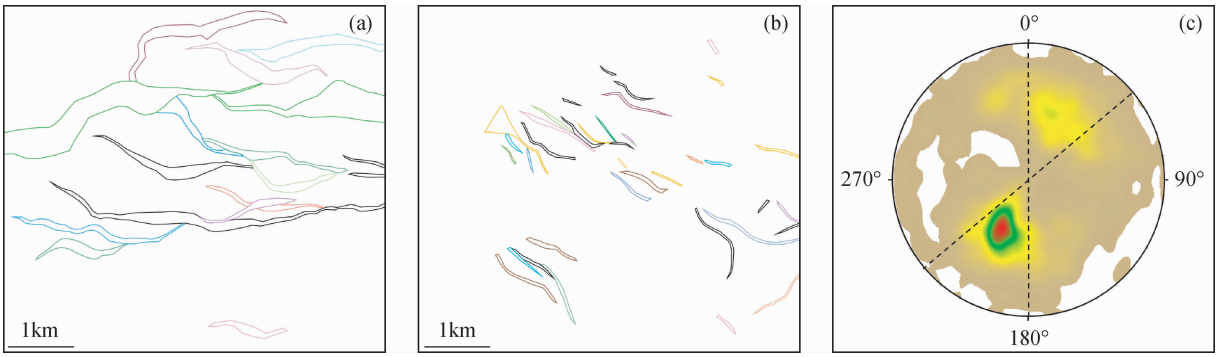


图 3 研究靶区断层统计示意图

(a)大规模断层走向图;(b)小规模断层走向图;(c)小规模断层倾向图.

Fig. 3 Fault statistics of the target zone

(a) The large-scale fault strike; (b) The small-scale fault strike; (c) The small-scale fault dip.

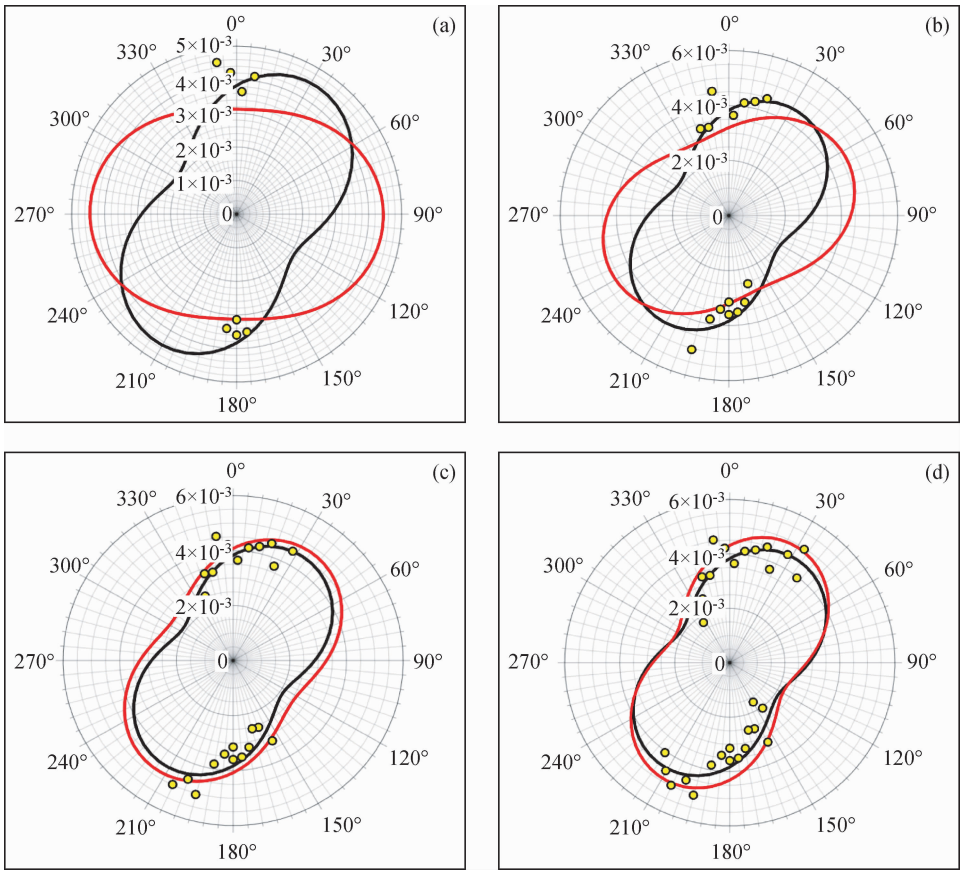


图 4 基于正演道集的方位各向异性拟合对比

从左到右方位角分别为 -10°~10°、-20°~20°、-30°~30°、-40°~40°.

Fig. 4 Comparsion of zimuthal anisotropy fitting based on forward modeling gathers

Left to right: -10°~10°, -20°~20°, -30°~30°, -40°~40°.

示,基于该分析统计低质量因子小尺度断层倾向集中在 0°~50°和 180°~230°区间内,因此 20°~30°为最优采集方向.

2.2 采集方位角

对于断层走向单一区域,理论上,垂直于其走向的窄方位拖缆采集即可对断层进行最佳成像.但对复杂断裂发育的北部湾盆地而言,其断层走向变化多样,不同方向存在较强的方位各向异性差异,因此,窄方位拖缆采集无法满足描述该种差异.基于该区具有电测井成像的已钻井开展叠前方位道集正

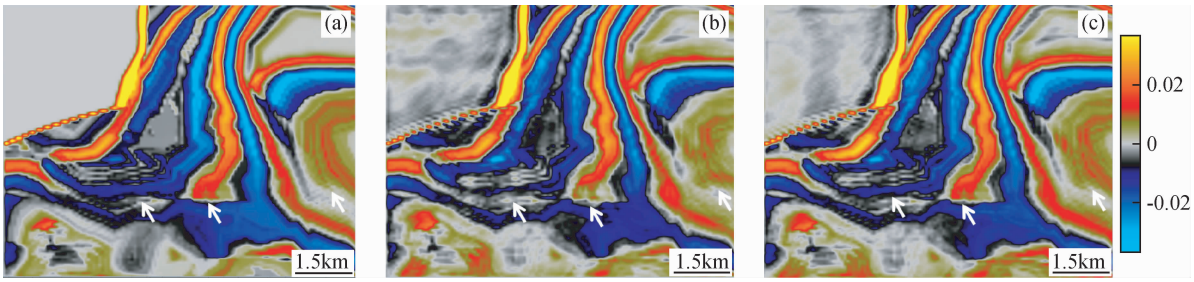


图 5 不同接收线距的目的层反射系数对比图

(a)模型;(b)线距 100 m;(c)线距 50 m.

Fig. 5 Reflection coefficient of different receiving line distance

(a) Model; (b) Line spacing 100 m; (c) Line spacing 50 m.

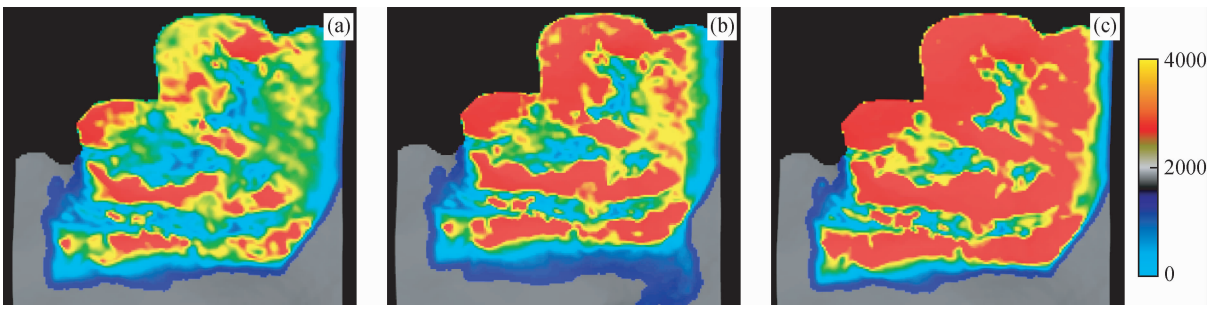


图 6 不同覆盖次数下目的层打击次数对比图

(a)240 次;(b)480 次;(c)720 次.

Fig. 6 Hit numbers of different fold

(a) 240 times; (b) 480 times; (c) 720 times.

演,并利用该正演道集开展不同方位角宽度情况下的椭圆拟合,拟合得到的椭圆(红色)与理论值重合度越高,证明方位各向异性计算越准确,如图 4 所示,基于该分析可知,以采集方向为中心,-30°~30°即可满足该区方位各向异性计算需求.

2.3 偏移距

充足的偏移距覆盖是深层准确成像和精细速度反演的基础,现有拖缆地震采集电缆长度 6000 m,理论上满足该区流沙港组(埋深 <6000 m)成像需求.但对该区而言,虽然 6000 m 偏移距满足该区层析速度反演需求,但层析速度反演方法受方法原理局限及道集数据信噪比影响,无法精细刻画复杂断裂区速度变化,而基于折射波的全波形反演方法通过炮集正演模拟与实际炮集差异求极小值的方式来逐步逼近真实速度模型,但该方法要求有足够大的偏移距以满足折射波信号接收.基于该区速度模型进行射线路径模拟,经分析,满足流二段速度刻画的折射波信号接收需要偏移距大于 12 km.

2.4 采样密度

基于模型开展正演成像分析,对目的层流沙港组进行不同接收线距与覆盖次数对比分析,如图 5、图 6 所示.接收线距为 100 m 时,箭头所指位置与模型存在明显差异,证明该线距无法准确恢复目的层段真实振幅,而当接收线距缩小为 50 m 时,当前关注目的层反射系数与真实值基本一致,满足恢复真实振幅特征的接收线距要求.照明分析中对目的层段打击次数越高越均匀,越有利于目的层段成像,图 6 中,随着覆盖次数由 240 次提高至 720 次,打击次数逐渐均匀,720 次覆盖对该区段成像相对更有利.

2.5 观测系统与采集成效

基于以上关键采集参数、设备分析论证,以及其他诸如震源容量、枪震排列等分析,针对性建立了 OBN 与高密度拖缆联合采集观测系统,部分关键采集参数如表 2 所示.其中,OBN 采集提供宽方位(横纵比 0.5)、长偏移距(12000 m)等关键信息,而高密度拖缆可以提供横向更密集采样(横向面元 12.5 m),旨在成本可控条件下实现 OBN 与拖缆优势互补,为复杂断裂区成像提供地震采集解决方案.

表 2 研究靶区实验采集关键参数表

Table 2 Seismic acquisition parameters of target zone experimental acquisition

采集方式	观测系统	最大炮检距/m	缆间距/m	道间距/m	炮间距/m	覆盖次数
OBN	Swath-30 缆	12000	200	100	37.5	1800
高密度拖缆	2 源 6 缆	6000	50	12.5	18.75	80

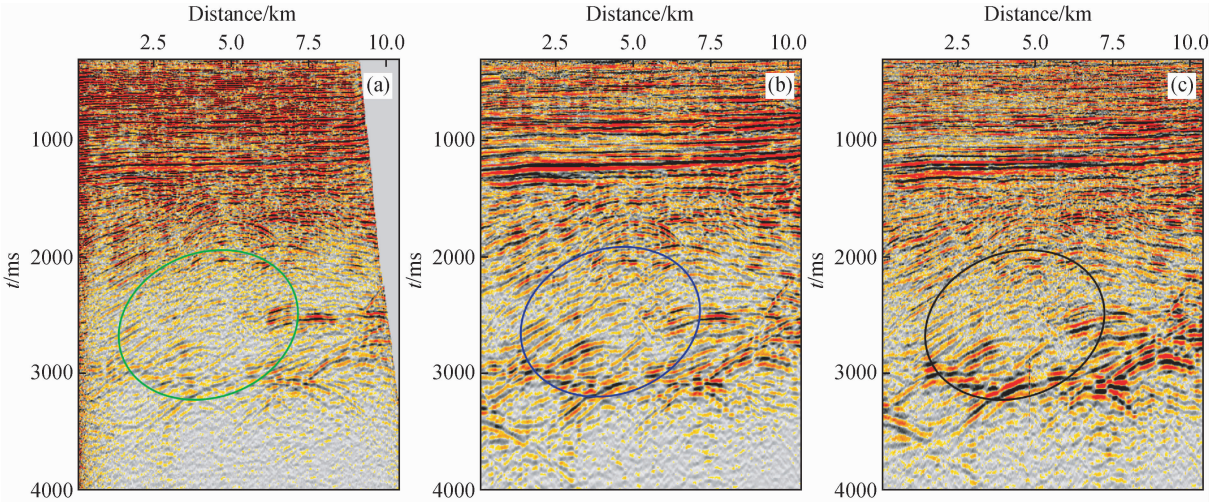


图 7 原始地震采集资料对比

(a)高密度拖缆;(b)OBN-P 分量;(c)OBN-Z 分量.

Fig. 7 Raw seismic data comparsion

(a) The high density streamer-tower; (b) OBN-P component; (c) OBN-Z component.

基于上述方案开展采集作业,对原始地震采集资料进行对比分析如图 7 所示. OBN 的 P、Z 分量资料相比于高密度拖缆资料覆盖次数高,信噪比明显提高,对三块资料相同目的层段时窗(分别用绿色、蓝色和黑色标注)进行频谱分析对比如图 8 所示,OBN 资料由于检波器特性差异及沉放深度更深,低频信号更丰富,相比于拖缆,更利于深层复杂断裂区成像.

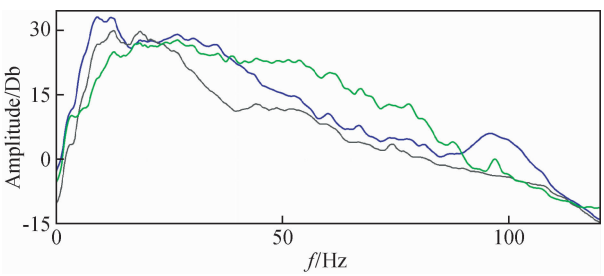


图 8 原始地震资料频谱对比

绿色:高密度拖缆;蓝色:OBN-P 分量;黑色:OBN-Z 分量.

Fig. 8 The spectrum Comparison of different seismic rawdata

Green: the high density streamer-tower;

Blue: OBN-P component; Black: OBN-Z component.

3 基于 FWI 的正交各向异性建模技术

速度建模精度是复杂断裂区是否能准确成像的关键. 层析速度反演方法因灵活简便在海洋地震资料中应用广泛,但对复杂断裂区速度建模适应性差,原因有二:(1)该方法通过叠前道集剩余曲率拾取进行速度更新,对道集信噪比有较高要求,而复杂断裂区地震数据因波场复杂、火成岩屏蔽等原因,有效反射信号较弱、信噪比较低,难以准确拾取剩余曲率;(2)受方法本身原理局限,层析速度反演较难准确刻画快速速度变化,进而影响复杂断裂区成像精度. 针对该问题,本次采用基于折射波的 FWI 反演方法进行速度建模,该方法通过初始速度模型进行正演得到模拟数据,并根据模拟数据与实际数据之间的折射波匹配误差大小逐渐更新速度模型至满足需求. 该方法虽然计算量大,相对耗时,但是相对层析速度反演方法有两点优势:(1)FWI 可反演至较高频率,精细刻画复杂构造区速度变化;(2)相比于反射波振幅受密度、噪声干扰等因素影响,折射波段受噪声干扰小,且振幅值主要受速度变化影响,反演

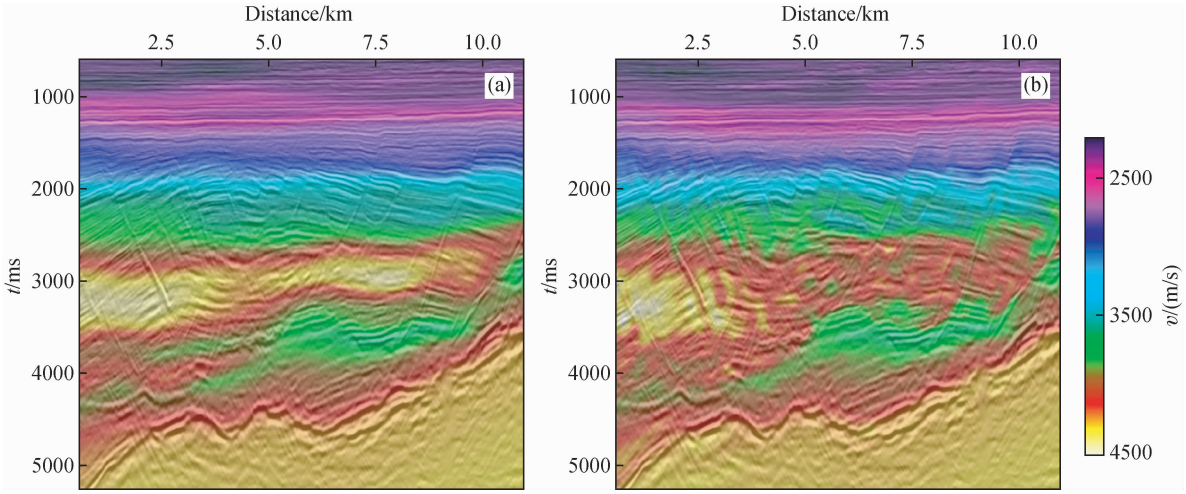


图 9 新老方法速度对比示意图
(a)层析法;(b)新方法.
Fig. 9 Velocity comparison of different method
(a) Tomographic method; (b) The new method.

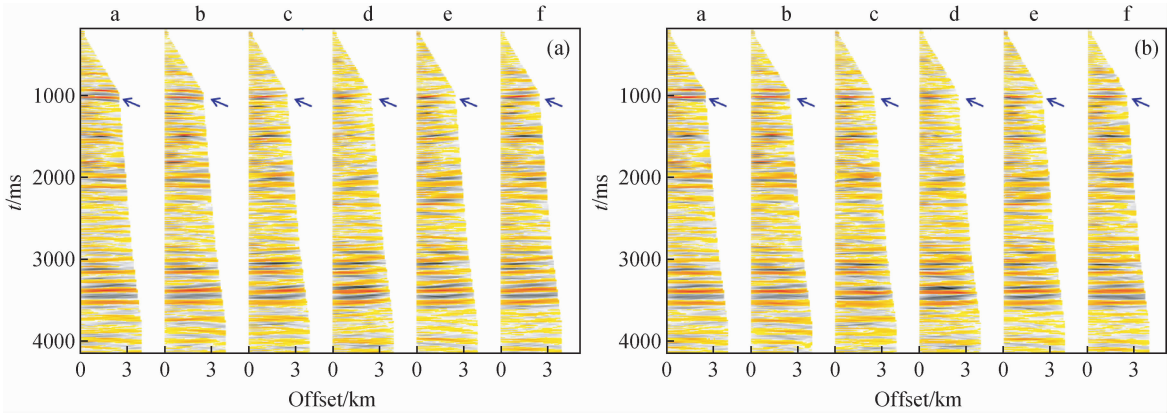


图 10 VTI 偏移道集(a)与 ORT 偏移道集(b)对比
a:0°;b:30°;c:60°;d:90°;e:120°;f:150°.
Fig. 10 Comparison of migrated gathers between VTI (a) and ORT (b) PSDM

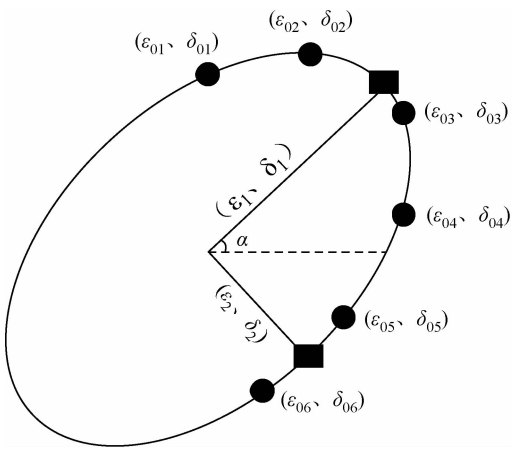


图 11 正交各向异性椭圆拟合示意图
Fig. 11 Schematic diagram of the ORT ellipse fitting

准确性更高. 另外,OBN 资料大偏移距及低频信号丰富,也为深层速度由低频向高频稳健反演提供高品质数据基础. 经实际地震资料对比处理分析,FWI 速度反演精度更高,尤其是花状断裂区,如图 9 所示.

基于该方法反演速度场开展 TTI 各向异性深度偏移获得道集如图 10a 所示,虽然道集整体校平程度较好,但是在箭头处不同方位道集成像不同程度上翘或者下拉,表明该区存在较强的方位各向异性,TTI 各向异性模型不满足地下复杂介质假设. 为此引入正交各向异性(Orthotropic,即 ORT)模型,即当断裂复杂发育时,因断层剧烈活动往往伴随垂直裂缝,造成不同方向弹性参数存在差异,相应地,地震波按照不同方向传播也存在速度等差异. 正交各向异性

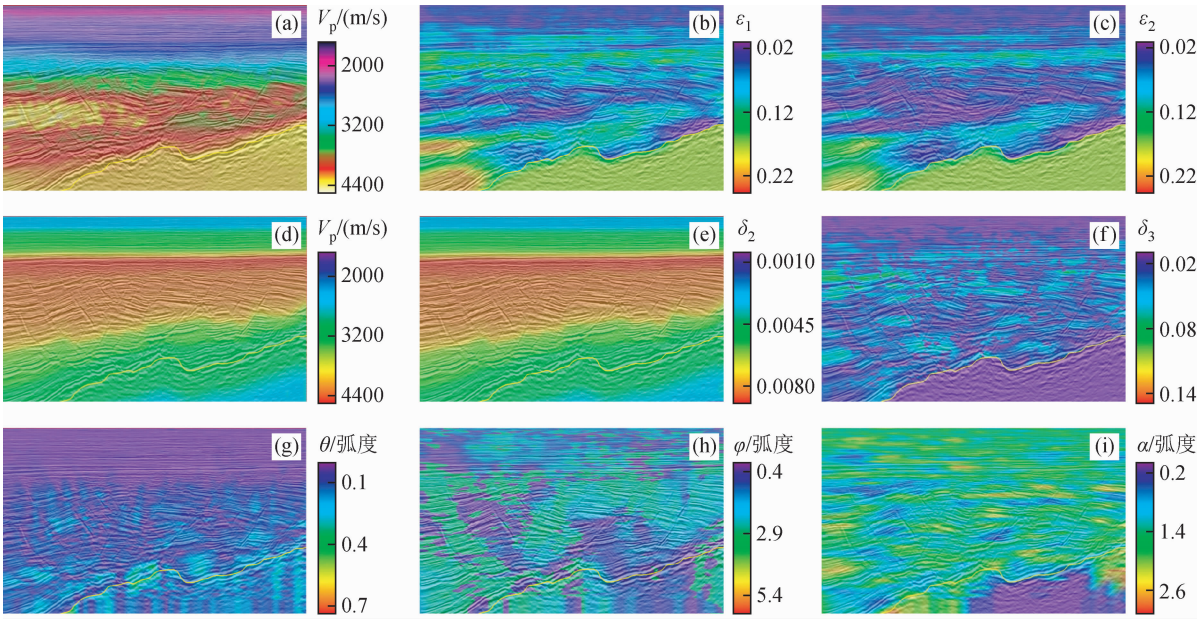


图 12 正交各向异性场

(a—i)分别为:V_p、ε_1、ε_2、δ_1、δ_2、δ_3、θ、ϕ、α.

Fig. 12 The ORT parameters

(a—i) Represent V_p、ε_1、ε_2、δ_1、δ_2、δ_3、θ、ϕ and α respectively.

介质弹性参数矩阵(Tsvankin,1997)通常表示为:

$$\boldsymbol{C}_{\text{ort}}=\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix}, \tag{4}$$

其中,C_{11}、C_{22}、C_{33}分别表示主方向上的弹性模量,C_{12}、C_{13}、C_{23}表示不同方向之间的剪切弹性常数,C_{44}、C_{55}、C_{66}表示三个平面上的剪切模量. 据此,可基于 9 个各向异性参数表征正交各向异性介质:V_p 为地震波垂向传播速度;ε_1、δ_1 为与垂直裂缝方向平行的各向异性参数;ε_2、δ_2 为与垂直裂缝方向垂直的各向异性参数;δ_3 为水平方向的各向异性参数;α、θ、φ 为裂缝方位角、对称轴倾角和对称轴方位角.

根据 Thomsen 公式可得:

$$\varepsilon_1=(c_{22}-c_{33})/2c_{33}, \tag{5}$$

$$\varepsilon_2=(c_{11}-c_{33})/2c_{33}, \tag{6}$$

$$\delta_1=[(c_{23}+c_{44})^2-(c_{33}-c_{44})^2]/[2c_{33}(c_{33}-c_{44})], \tag{7}$$

$$\delta_2=\lfloor(c_{13}+c_{55})^2-(c_{33}-c_{55})^2\rfloor/[2c_{33}(c_{33}-c_{55})], \tag{8}$$

$$\delta_3=\frac{1}{2}[(\sqrt{(1+2\delta_1)(1+2\delta_2)}+2\sqrt{(\varepsilon_1-\delta_1)(\varepsilon_2-\delta_2)})^2/(1+2\varepsilon_2)^2-1], \tag{9}$$

其中,V_p 由 FWI 速度反演给出,θ、φ 通过地震成像扫描进行估算,因此,理论上,通过计算 ε_1、δ_1、ε_2、δ_2、δ_3、α 即可确定全部正交各向异性参数. 其中,ε_1、δ_1、ε_2、δ_2、α 可通过椭圆拟合求得,将 ε_1、δ_1、ε_2、δ_2 代入(9)式可得 δ_3.

其具体做法为:

(1)开展方位角分组:针对宽方位成像道集开展方位分组,原则为分组后各方位覆盖次数相对均匀且保持相对较高的信噪比,理论上,不同方位信息均匀的情况下,分组越多,正交各向异性刻画越准确,但受海上实际地震采集横纵比局限,横向偏移距信息往往较少,影响正交各向异性准确求取. 本次经过测试认为从 0°到 180°间隔 30°均分成 6 个方位,地震数据各方位信息相较均匀,适合后续处理.

(2)开展不同方位 TTI 各向异性建模:基于已钻井约束对不同方位地震建立初始 TTI 各向异性场,并根据各方位组道集同相轴曲率等校正更新各向异性场,求得六个方位各向异性参数 ε_{0n}、δ_{0n}($n=1,2,3,4,5,6$).

(3)基于椭圆拟合计算正交各向异性参数:联合六个方位各向异性参数 ε_{0n}、δ_{0n}($n=1,2,3,4,5,6$)基于 Ransac 法开展椭圆拟合,如图 11 所示,进而

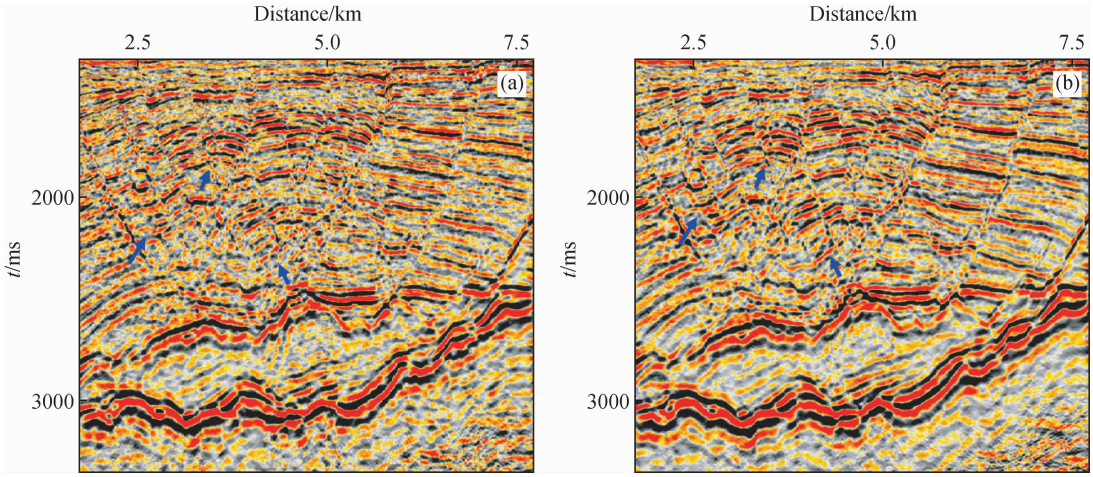


图 13 基于正交各向异性建模偏移与基于 TTI 偏移剖面对比

(a)TTI 偏移;(b)正交各向异性偏移.

Fig. 13 Comparison of different seismic profiles

(a) Migration with TTI; (b) Migration with ORT.

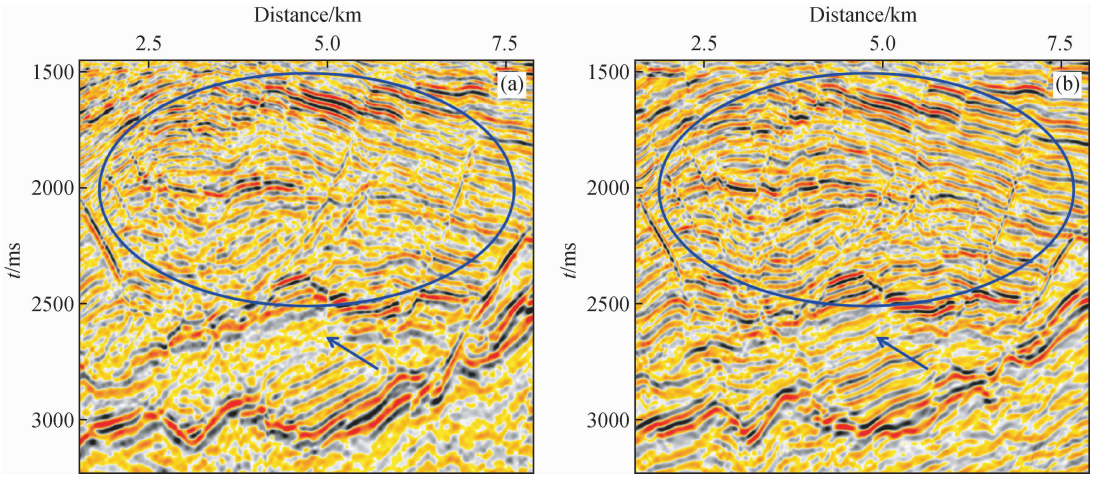


图 14 新老地震资料成果剖面对比

(a)拖缆老资料;(b)新资料.

Fig. 14 Comparison of different seismic profiles

(a) Old seismic data; (b) New seismic data.

求得快波各向异性参数 ε_1、δ_1 和慢波方向的各向异性参数 ε_2、δ_2 以及裂缝方位角 α,代入(9)式求得 δ_3.

基于上述方法得到复杂断裂区的正交各向异性场,如图 12 所示. 基于该各向异性场进行偏移成像并得到偏移道集,如图 10b 所示,因方位各向异性刻画不足导致的不同方位道集上翘或下拉现象得以较好校正,利于复杂断裂区准确成像.

4 实际应用

北部湾盆地受复杂断裂影响,涠洲组成像破碎、地层连续性较差,流沙港组地层反射杂乱,制约该区中深层目标精细评价. 基于本次采集处理技术研究,开展 OBN 与高密度拖缆联合采集并进行针对性处理,相对以往拖缆老资料,显著提升了复杂断裂区地震资料品质,如图 14 所示,在椭圆标识位置,涠洲组复杂断裂成像明显改善,小断层断点更清晰、断层夹持地层反射信噪比更高,而复杂断裂下覆流沙港组地层在老拖缆资料中表现为弱杂乱反射,无法有效开展地层解释,但新资料中地层反射连续性大幅改善,且整体分辨率有明显提升,提高了该区解释精度. 对新老地震资料复杂断裂区位置分别提取相干

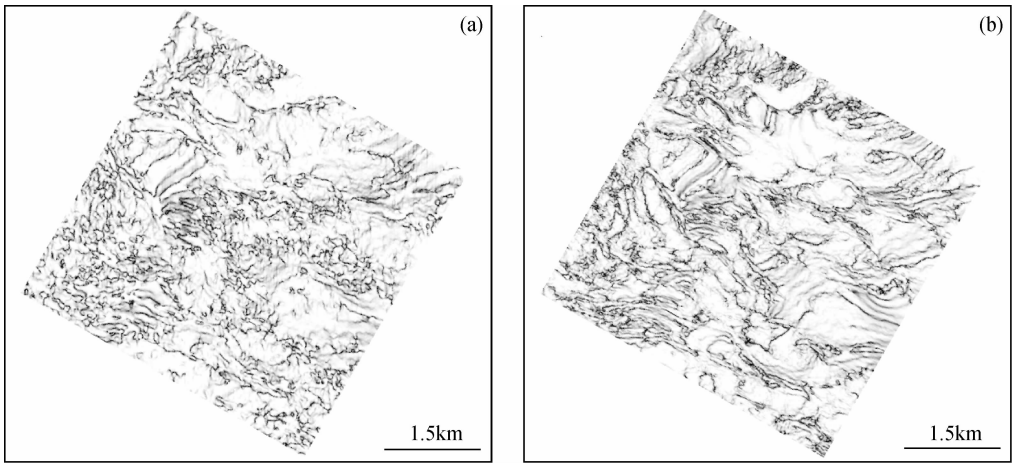


图 15 新老地震资料成果相干属性对比图
(a)拖缆老资料;(b)新资料.
Fig. 15 Coherence attributes comparison of different seismic data
(a) Old seismic data; (b) New seismic data.

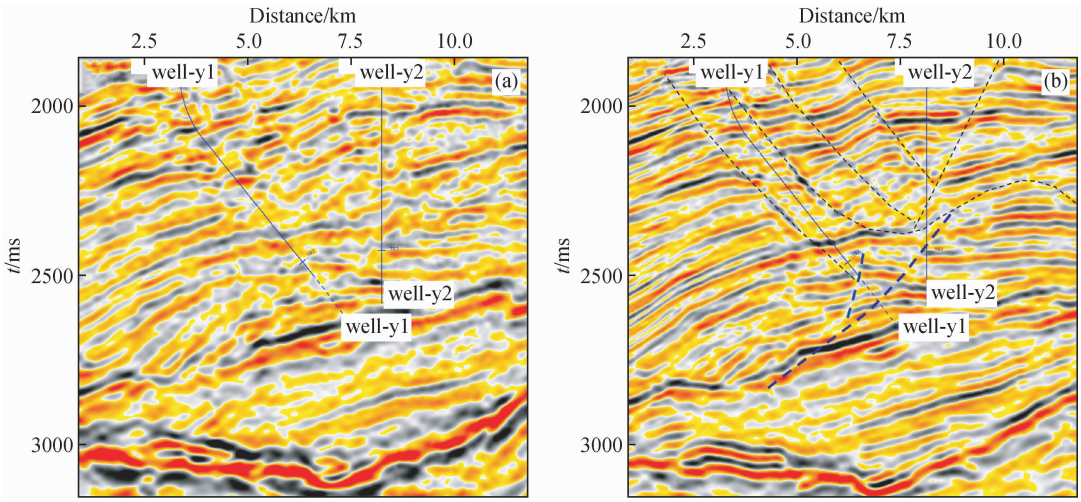


图 16 新老地震资料成果对比
(a)拖缆老资料;(b)新资料.
Fig. 16 Comparison of different seismic profiles
(a) Old seismic data; (b) New seismic data.

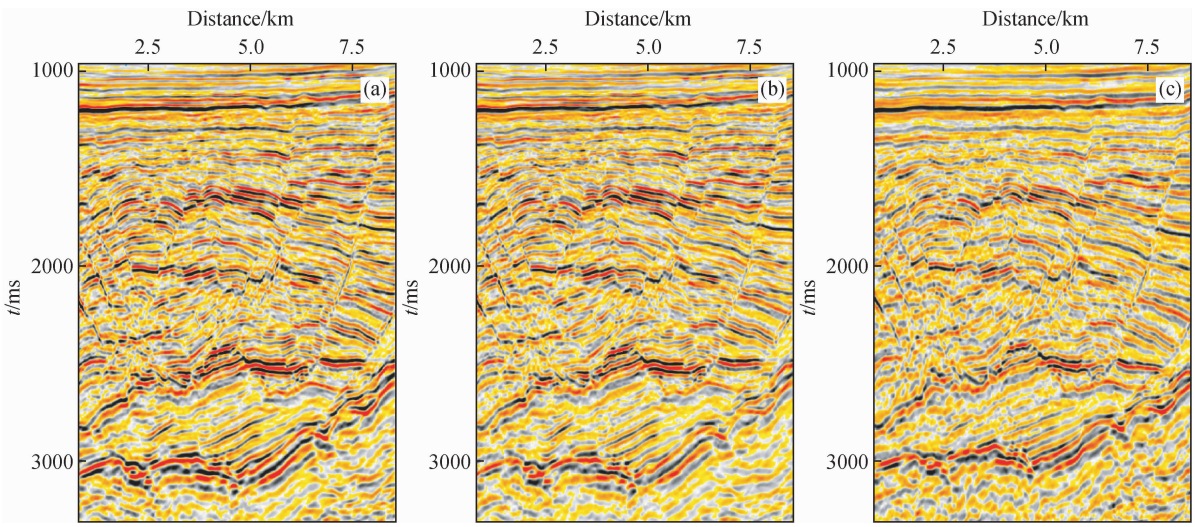


图 17 地震剖面对比
左:200 m×100 m OBN;中:400 m×100 m OBN+拖缆融合;右:400 m×100 m OBN.
Fig. 17 Comparison of seismic profile
left: 200 m×100 m OBN; mid: 200 m×100 m OBN with the towed-streamer; right:400 m×100 m OBN.

属性表征断层,如图 15 所示,老资料断层成像杂乱无序、断层可追踪性差,而新资料断层成像清楚、连续性好、分辨率较高,断层可解释性大大提高.

在勘探应用方面,老资料无法解释已钻井油水矛盾现象,即相邻已钻井 well-y1 流一段低部位为油层,well-y2 流一段高部位为水层,老拖缆地震资料资料品质较差,无法准确解释,如图 16 所示,新资料地震成像改善后,断层成像清晰,well-y1 和 well-y2 之间明显存在断层(蓝色虚线),断层封堵造成了两口井的高低部位油水差异,完美解释了油水矛盾问题.

另外,为验证高密度拖缆资料是否可以弥补稀疏 OBN 资料成像不足,对原始炮检密度 200 m×100 m 采集的 OBN 地震抽稀成 400 m×100 m,抽稀后地层连续性明显变差,而基于 400 m×100 m 的 OBN 资料与高密度拖缆资料进行联合成像,其结果明显优于 400 m×100 m 的 OBN 资料单独成像结果,且局部地层反射连续性优于 200 m×100 m 的 OBN 成像结果,如图 17 所示.

5 结 论

本文针对复杂断裂区成像难题,开展基于 krigin 插值的精细断层数值建模的采集参数定量评估及基于 FWI 的正交各向异性建模技术研究,获得显著实际资料成像改善,得出以下结论:

(1)宽方位、高覆盖、长偏移距的 OBN 地震采集相对窄方位、低覆盖拖缆地震采集,对复杂断裂区波场照明更强,为复杂断裂区准确成像提供更充足的波场信号基础.

(2)基于 FWI 的正交各向异性建模相对常规 TTI 建模,更符合垂直裂缝发育的地下介质假设,为复杂断裂区成像提供更准确的各向异性速度场.

(3)高密度拖缆与稀疏 OBN 联合成像,可显著改善稀疏 OBN 成像品质.

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

Gui J Ch, Zeng B, Jing Ch. 2026. Elastic parameters predicting and its influencing factors analyzing in orthotropic shale formation. Progress in Geophysics, 41(2): 940-954.

Guo K, Zhang Y S, Feng Y B. 2019. Multi-parameter modeling of orthotropic media. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 58(6): 874-881.

He Y, Zhang W W, Liu P, *et al*. 2024. Application of high precision complex fault imaging in Huizhou 21 Sag, eastern South China Sea. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 63(2): 346-356.

Kang P F, Hu Y, Liu R D, *et al*. 2025. Local-scale frequency-wavenumber domain phase inversion. Progress in Geophysics, 40(1): 155-165.

Li L, Gai Y H, Ouyang M, *et al*. 2019. Technologies with two azimuths in west area of South China Sea: a case study of Zhusan Sag. Earth Science (in Chinese), 44(8): 2590-2596.

Li Z, Zhao R R, Zhou Q, *et al*. 2022. Application of irregular surface TTI anisotropic velocity modeling technology in Kedong complex mountains. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 57(S1): 70-77.

Liu J Y. 2025. 3D prestack fracture prediction method and technology based on high precision azimuth gradient of division-directional compressional-wave. Progress in Geophysics, 40(4): 1463-1472.

Lu T X, Li M, Gai Y H, *et al*. 2024. Application of post-and-pre-stack multi-scale fracture prediction technology based on OBC seismic data in the reservoir of Weixinan buried hill. Computing techniques for Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 46(2): 154-163.

Tsvankin I. 1997. Anisotropic parameters and P-wave velocity for orthorhombic media. Geophysics, 62(4): 1292-1309.

Wang X L, Zhang J N, Zhao M, *et al*. 2019. Application of grid tomographic inversion based on fault regularization in deep domain velocity field modeling. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 49(6): 79-85.

Wang Z L, Xu X D, You J J, *et al*. 2022. Application of fluorescence spectroscopy of hydrocarbon inclusions in the study of hydrocarbon accumulation stages in Wushi Sag. China Offshore Oil and Gas (in Chinese), 34(5): 46-55.

Xiao Y F, Huo H, Huang P, *et al*. 2026. Optimal design of high precision observation system for secondary acquisition in the eastern sichuan region—a case study in the JN area. Progress in Geophysics, 41(1): 325-340.

Xiao Z B, Zhang S F, Lei Y C, *et al*. 2021. Application of a joint imaging technique entailing dual-azimuth seismic data acquired by deeper-towing flat-streamers on complex structures of the Paleogene. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 60(6): 971-982.

Zheng H, Liu J C, Wan C C. 2021. Fault-constrained velocity tomography in the depth domain. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 60(4): 556-564, 573.

Zhou J Y, Li Z W, Pan X P, *et al*. 2022. Application of seismic fusion processing technology in Weixi complex fault area. Marine Geology Frontiers (in Chinese), 38(8): 86-94.

附中文参考文献

桂俊川, 曾波, 荆晨,等. 2026. 正交各向异性页岩地层弹性参数预测及其影响因素分析. 地球物理学进展, 41(2): 940-954.

郭恺, 张永升, 冯彦彬. 2019. 正交各向异性介质多参数建模方法研究. 石油物探, 58(6): 874-881.

何叶, 张卫卫, 刘培, 等. 2024. 复杂断裂精细成像技术在南海东部惠州 21 洼的应用. 石油物探, 63(2): 346-356.

康鹏飞, 胡勇, 刘瑞东, 等. 许永忠. 2025. 局部尺度频率波数域相位反演. 地球物理学进展, 40(1): 155-165.

李列, 盖永浩, 欧阳敏, 等. 2019. 南海西部双方位地震资料处理关键技术实践: 以珠三凹陷为例. 地球科学, 44(8): 2590-2596.

李忠, 赵锐锐, 周强, 等. 2022. 起伏地表 TTI 各向异性速度建模技术在柯东复杂山地的应用. 石油地球物理勘探, 57(S1): 70-77.

刘军迎. 2025. 基于分方位纵波高精度方位梯度法三维叠前裂缝预

测方法与技术. 地球物理学进展, 40(4): 1463-1472.

鲁统祥, 李明, 盖永浩, 等. 2024. 基于 OBC 地震资料的叠后叠前多尺度裂缝预测技术在涠西南潜山储层中的应用. 物探化探计算技术, 46(2): 154-163.

王新领, 张健男, 赵明, 等. 2019. 基于断层正则化的网格层析反演在深度域速度场建模中的应用. 中国海洋大学学报(自然科学版), 49(6): 79-85.

汪紫菱, 徐新德, 游君君, 等. 2022. 烃类包裹体荧光光谱技术在乌石凹陷油气成藏期次研究中的应用. 中国海上油气, 2022, 34(5): 46-55.

肖云飞, 霍浩, 黄鹏, 等. 2026. 川东地区二次采集高精度观测系统方案优化设计——以 JN 工区为例. 地球物理学进展, 2026, 41(1):325-340.

肖张波, 张素芳, 雷永昌, 等. 2021. 深拖平缆双方位地震资料联合成像技术在古近系复杂构造区的应用. 石油物探, 60(6): 971-982.

郑浩, 刘俊辰, 万城程. 2021. 基于断裂属性约束的深度域层析速度建模技术. 石油物探, 60(4): 556-564, 573.

周静毅, 李振伟, 潘新朋, 等. 2022. 地震融合处理技术在涠西复杂断裂地区的应用. 海洋地质前沿, 38(8): 86-94.