

文章编号: 1001-1749(2023)06-0707-10

陆丰凹陷复杂断裂带双方位地震资料 联合成像技术研究

蒋亚洲, 杜军锋

(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)

摘要: 陆丰凹陷 A 洼工区面积小, 油气储量大, 原有采集地震资料分辨率低, 多次重处理之后目的层接触关系难以确定, 复杂断裂带及陡倾角基底成像模糊, 难以满足勘探需要。因此在该区进行了二次三维地震资料采集, 采集方位正交。针对同一区块不同方位采集的三维地震资料, 分析不同方位地震资料的差异性, 针对性的提出使用断层约束的双方位资料联合层析反演技术来求取精度更高的速度场, 通过 TTI 各向异性中的倾角和方位角属性解决不同方位资料陡倾角地层的同相轴错动, 提高偏移归位精度, 更好地实现双方位资料的融合成像, 古近系陡倾角地层成像品质提升明显, 地层连续性、信噪比更高, 为后续目标评价工作提供可靠的基础资料。

关键词: 陆丰凹陷; 复杂断裂带; 双方位资料; 断层约束层析; TTI 各向异性

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.06.03

0 引言

陆丰凹陷 A 洼处于陆丰凹陷南部, 位于珠江口盆地地球一拗陷东北部, 水深约 90 m, 工区钻井证实多个含油气构造, 是珠江口盆地古近系勘探最具潜力的区域^[1-5], 区块已经实现三维地震资料的全覆盖, 早期采集的地震资料受当时采集技术的局限, 即使多次重处理仍然存在目的层段薄砂体接触关系难以确定, 复杂断层、小断层成像不清楚, 古近系陡倾角基底成像模糊等问题, 难以满足勘探需要, 二次三维地震采集迫在眉睫。近年来海上地震资料采集越来越重视多、宽、全方位采集, 勘探实例证实, 多、宽、全方位地震资料, 可以有效改善地下深层复杂构造区的地震波场照明度, 在复杂地质条件下的深部勘探和岩性、裂缝油气藏勘探领域应用前景广阔^[6-10]。相对海上多船宽方位采集及 OBC(海底电

缆)、OBN(海底节点)等高成本采集方式, 双方位地震资料采集兼顾宽方位采集的部分优势, 是一种经济有效的方法^[11]。为最大程度上改善复杂断裂带照明, 二次三维地震资料采集方向应与原有三维地震资料采集方向垂直^[12]。

如何解决不同方位角采集时, 地震资料因波场传播路径不同造成的速度差异及各向异性问题, 是双方位地震资料联合成像的核心难点。Ts-vankin^[13]、Grechka^[14]和 Xie^[15]对不同方位波场传播的速度差异及各向异性参数求取进行一系列研究, 谢涛等^[16]、朱明等^[17]、胡高伟等^[18]研究了双、多方位资料处理的技术及应用效果。

笔者针对陆丰凹陷 A 洼同一采集参数、采集方位正交的三维地震资料, 分析不同方位地震资料在复杂断裂带的速度及成像差异, 采用断层约束的双方位资料联合速度建模方法, 求取更加真实的地下介质速度模型, 求取不同方位资料的 TTI 各向异性

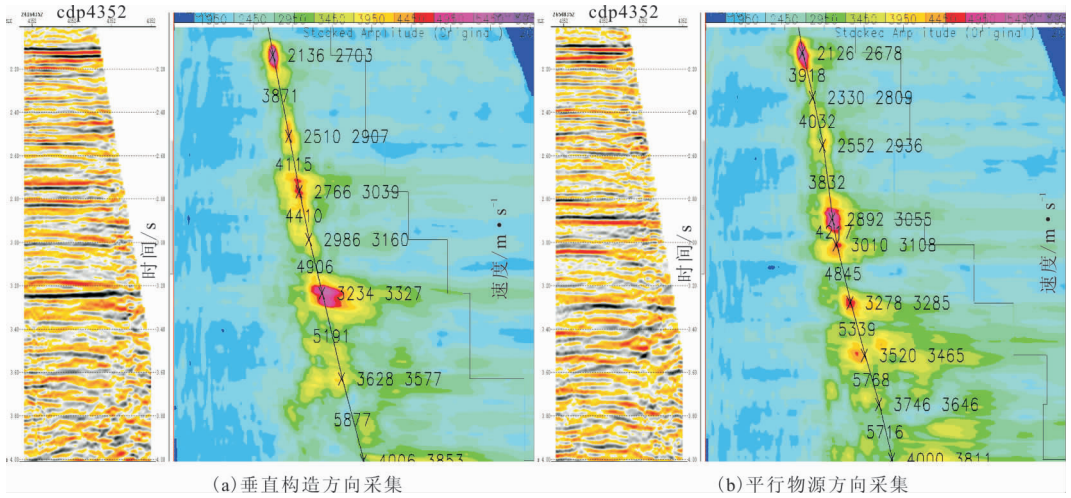


图 1 不同方位采集数据速度差异

Fig. 1 Speed differences of different azimuth data

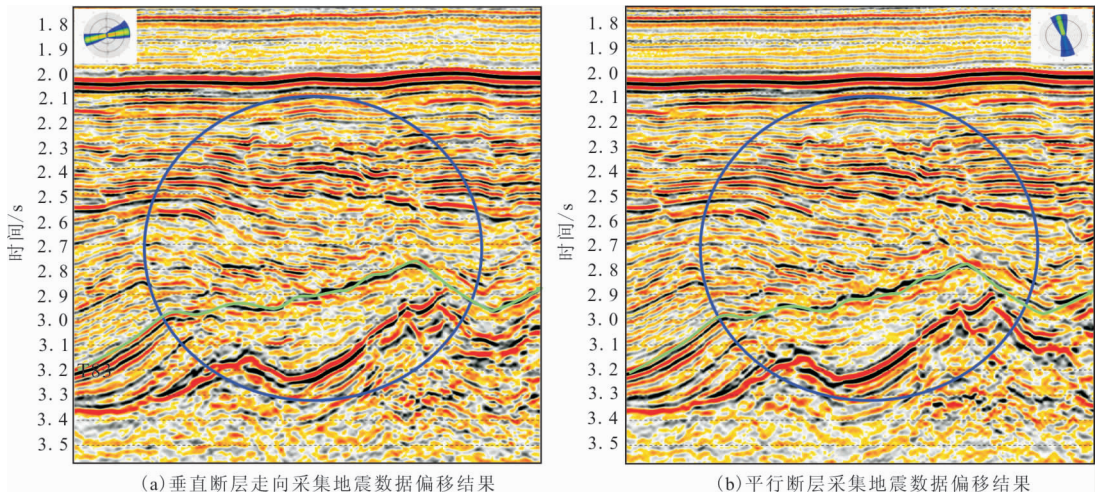


图 2 不同方位数据偏移成像差异

Fig. 2 Difference in migration imaging of different azimuth data

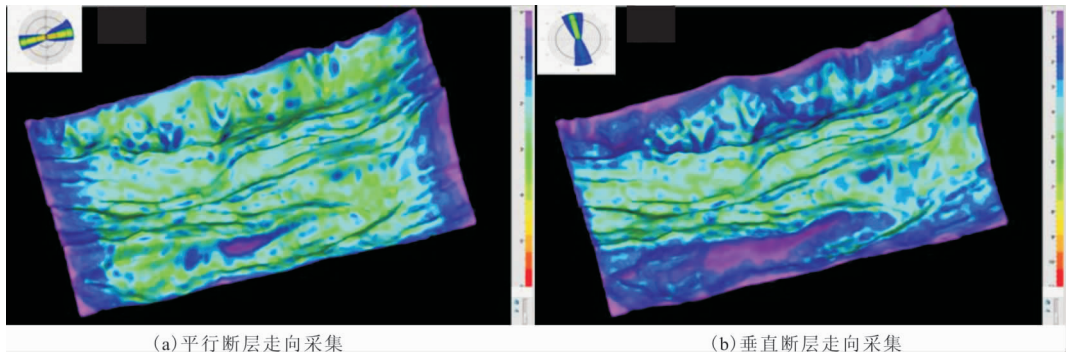


图 3 不同方位数据在 T83 层照明度差异

Fig. 3 The illumination difference of different azimuth data in T83 layer

体进行 TTI 各向异性叠前深度偏移成像,消除复杂断裂带地层同相轴错动现象,实现不同方位资料成像结果的同相融合,改善工区复杂断裂带陡倾角地

层的成像品质,提高了双方位融合成像资料的可靠性,从而为该地区地质目标评价提供了高质量的基础数据。

1 不同方位角采集资料的差异性分析

为消除地震采集参数设计(气枪容量、电缆长度、枪深、缆深等)不同带来的成像差异,本次工区二次三维采用同一物探船先后沿垂直工区主要断层走向(北西—南东方向)和平行物源方向(北东—南西方向)进行海上作业,采集得到的地震数据按照同一处理流程进行前置处理,确保数据差异仅由不同方位角采集造成的。分析图 1 可知,在陡倾角地层不同方位角采集地震数据的速度分析结果并不相同,陡倾角地层处叠加谱速度差异明显。不同方位地震数据偏移结果对比见图 2。

图 3 为不同方位地震数据在古近系 T83 层地震波场照明度对比图。图 3(a)为平行断层走向采集地震数据在 T83 层处的地震波场照明度图,图 3(b)为垂直断层走向采集地震数据在 T83 层处的地震波场照明度图。综合分析图 2、图 3 可知,垂直断层走向采集地震数据断面成像更加清晰,但在 T83 层的波场照明分布不均匀;平行断层走向采集地震数据地层成像更加清晰,在 T83 层的波场照明分布也比较均匀,但断面成像比较模糊。

对图 1、图 2、图 3 综合分析可知,不同方位角采集资料的成像速度、地层及断面成像、地震波场照明度等方面差异性明显,且各有优劣。利用双方位资料进行联合反演,得到精度更高、统一的地下介质速度模型,进而改善古近系陡倾角地层的偏移成像效果,是笔者讨论的核心内容。

2 双方位资料联合成像关键技术

在地震资料处理流程中,准确求取地下介质的速度信息是整个处理流程的核心问题,深度域速度场的精度直接影响深度偏移的成像效果,也影响着后续的地质目标评价工作。地下介质普遍存在各向异性,工区双方位资料联合成像处理过程中需要考虑不同方位资料的各向异性差异,否则即使在速度准确的前提下,偏移过程中如不考虑地下介质的各向异性,也会导致陡倾角地层空间位置无法正确归位,不同方位资料同一套陡倾角地层空间位置不一致,进而导致后续融合处理时无法同相融合,因此双方位资料联合成像的关键是如何求取地下介质准确的速度信息和不同方位资料的各向异性体。

综合研究分析,本文双方位资料速度建模关键

技术流程主要分为两步:①在双方位资料联合层析反演过程中引入断层等地质信息作为预条件算子,求取更加准确的地下介质速度模型;②考虑两个方位之间各向异性差异,求取不同方位资料准确的 TTI 各向异性进行 TTI 叠前深度偏移。通过技术的应用实现不同方位资料陡倾角地层空间位置正确归位,为后续的融合处理提供高品质基础资料,更好的实现不同方位资料同相融合,提升双方位资料联合成像品质。

2.1 断层约束的双方位资料联合速度建模

断层两侧地层速度横向变化剧烈是造成复杂断裂带成像品质不佳的主要因素。双方位采集资料可以提高地震资料的信噪比、丰富复杂断裂带地层的波场照明度。常规的双方位资料联合层析反演可以降低速度反演的不确定性,一定程度上提高速度反演的精度和准确性。但是基于旅行时层析算法的常规网格层析迭代反演技术,只能求取得到光滑的速度场,无法准确刻画断层两侧地层速度横向变化。因此在联合求解两个方位的层析方程组时,引入断层和层位数据体作为预条件算子,在复杂断裂区域层析反演时,断层起截断滤波效应,保证反演求解的断层两侧速度更新量互不干扰。由图 4 可知,相比常规的网格层析技术,在速度层析时引入断层和层位约束可以准确刻画断层两侧的速度横向变化,增加速度反演细节信息,提高速度反演分辨率。

建立合理可靠统一的光滑背景初始速度模型是后续速度层析反演的基础,利用双方位资料在断层的约束下进行联合层析反演,是获取地下介质真实速度模型的关键。如果对不同方位资料各自进行速度建模及层析反演,难以得到一致统一的速度模型,进而导致不同方位资料同一套地层存在深度误差。断层约束的双方位资料联合层析技术关键步骤如下:①分析测井、地震速度规律,建立统一的初始速度模型;②建立与速度模型网格等同的断层和层位数据体;③按照采集方位角的不同将地震数据划为两个扇区,分别进行 PSDM(Prestack Depth Migration, 叠前深度偏移)得到不同的 CIG 道集(Common Image Gather, 共成像点道集);④在不同方位的 CIG 道集上分别拾取 RMO(Residual Moveout, 剩余时差);⑤对不同方位的 RMO 分别进行射线追踪建立层析方程组;⑥将两个方位的层析方程组并联在一起在断层与层位的约束下求解,得到一致的速度模型更新量;⑦经过多次速度迭代更新,获得满足条件的速度模型(深度域)。

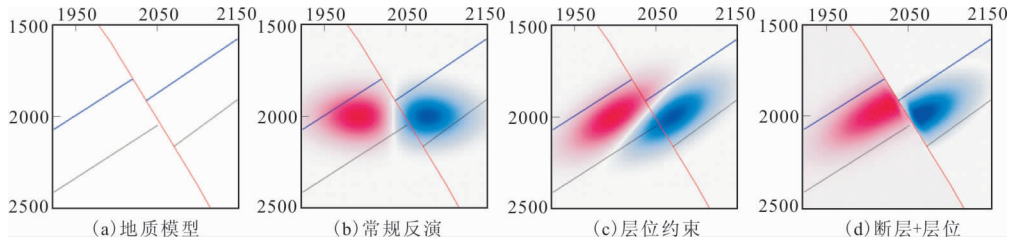


图 4 不同预条件算子下层析反演速度更新量示意图

Fig. 4 Tomographic inversion residual velocity under different preconditions

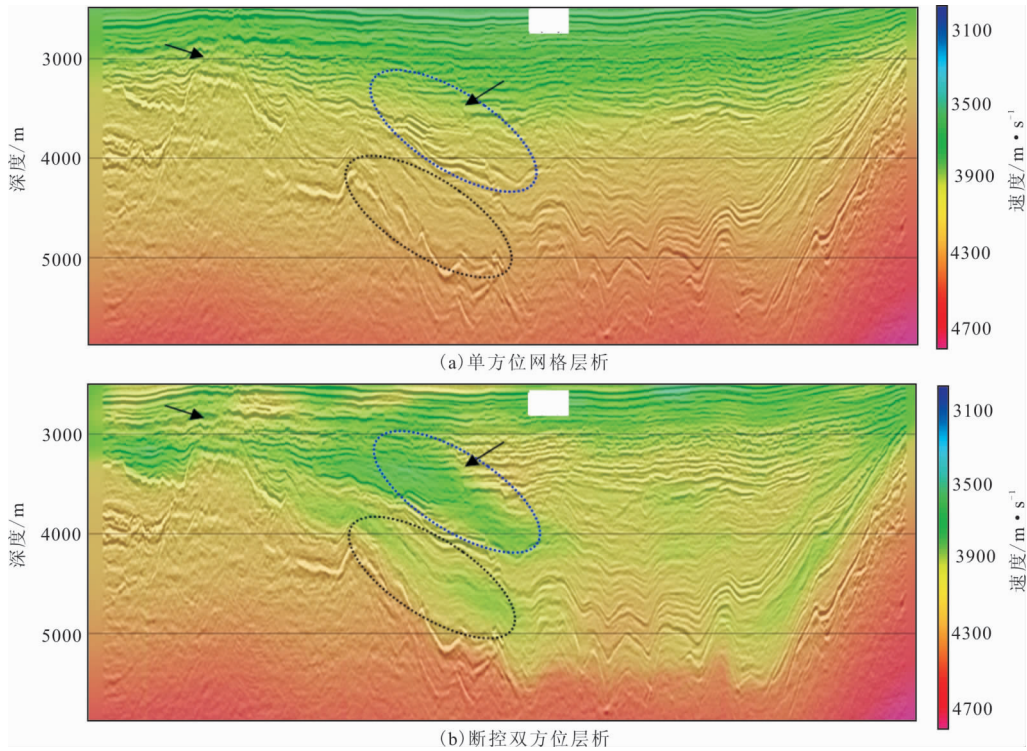


图 5 不同方法反演速度场对比图

Fig. 5 Comparison of velocity field by different way

对比图 5(a)、图 5(b)可知,图 5(a)中的速度场为光滑的背景速度场,速度细节信息不丰富,图 5(b)中的速度场剖面整体分辨率更高,在断层两侧(黑色箭头处)速度横向变化明显,并且存在两套明显的低速反转地层(蓝色椭圆、黑色椭圆标识处)。图 6 为抽取井点处不同方法反演得到的速度模型与测井声波速度曲线的对比分析图,可以看出,相比单方位常规网格层析反演得到的速度场,断层约束下双方位资料联合反演得到的速度场整体更加吻合测井声波速度变化规律,且明显的速度反转在测井声波速度曲线上得到证实。结合工区其他已有测井资料及地化分析,两套低速地层为工区发育的两套低速烃源岩,分别对应上文昌潜湖相烃源岩(蓝色椭圆处)和文四段中深湖相烃源岩(黑色椭圆处)。断层

约束的双方位联合层析反演得到的速度场符合钻井揭示的速度规律,能较好地刻画工区的低速烃源岩,有利于后续的洼陷烃源潜力评价工作。

2.2 双方位 TTI 各向异性偏移联合成像

地下介质为各向异性介质,不同方位角进行地震数据采集时存在方位各向异性问题,双方位数据联合成像过程中必须考虑不同方位之间各向异性的差异性。工区早期地质活动剧烈,目标区地层抬升改造强烈,中深层高陡断裂和陡倾角地层发育丰富,TTI 各向异性(倾斜横向各向异性)处理中考虑了地下介质的倾角信息(dip)和方位角属性(azim),更加接近地下介质的真实情形。在不同方位角资料处理时,每个方位可以用分别独立的 TTI 各向异性近似。笔者采用双方位 TTI 各向异性联合层析方法

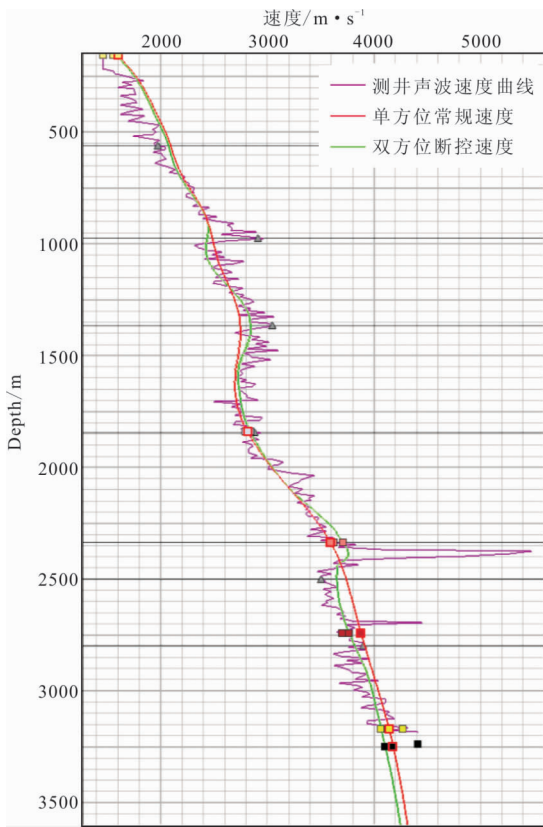


图6 不同方法反演速度场与测井质控对比图
Fig. 6 Velocity comparison between well and seismic inversion in different ways

解决双方位资料之间的差异。

陆丰凹陷 A 洼为勘探成熟区, 工区已有测井 20 余口, 在工区内较为均匀分布, 为分析井震误差求取工区各向异性参数提供可靠数据, δ 的估算公式^[19-20]为式(1)。

$$\delta^i = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{D_s^i}{D_w^i} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中: D_s^i 为深度偏移地震资料解释的第 i 层厚度; D_w^i 为测井资料解释的第 i 层厚度。

图 7 所示为双方位联合成像技术流程图, 关键步骤如下: ①基于断控约束反演层析的统一速度场, 根据公式(1)获得不同井位处各套地层的 δ 值, 对求取得到的 δ 值沿地层层位进行地质导向插值^[21], 获得工区初始 δ 体, 进而求取初始 ϵ 体、初始 dip 体和初始 azim 体; ②对不同方位资料进行偏移, 迭代更新不同方位的各向异性参数; ③采用统一速度场和不同方位各向异性参数对 2 个方位资料分别进行 TTI 叠前深度偏移得到各自的偏移结果; ④对 2 个方位的偏移后道集通过自动寻优技术融合处理, 进而得到最终的双方位 TTI 叠前深度偏移联合成像

结果。

图 8 是基于本文方法求取得到的统一速度场 V_a 体(图 8(a))、各向异性 δ 体(图 8(b))、dip 体(图 8(c))、azim 体(图 8(d))。层析反演模型分辨率高、细节信息丰富, 不同层系地层具有明显区分, 构造分布合理, 与凹陷内测井信息吻合度高。

由图 9 可知, 不同方位资料的 ϵ 体构造形态基本保持一致, 区别在于东西方位资料的 ϵ 体总体小于南北方位资料的 ϵ 体。

由图 10 分析可得, 在陡倾角地层和高陡断裂带, 双方位联合层析速度偏移后道集整体拉平度更高, 消除不同方位道集同相轴上翘下弯现象, 说明双方位联合层析得到的速度模型和各向异性体, 更加符合实际地质情况, 成像更准确, 不同方位道集一致性更好, 为后续的双方位资料融合处理提供高品质基础资料。

3 实际应用效果分析

目标区受区域地质活动影响, 中深层地层产状变剧烈, 基底附近高陡地层及次生小断裂发育丰富, 复杂构造区成像困难, 难以识别解释断裂组合, 影响后续地质目标评价。针对本次采集的双方位地震资料, 采用断层约束的双方位联合速度建模、双方位 TTI 各向异性建模等技术, 求取获得更加准确的地下介质速度体及各向异性体, 不同方位资料陡倾角地层空间位置准确归位, 实现不同方位地震联合成像的最优化融合。

从图 11 可以看出, 双方位资料融合成像结果集合不同方位资料成像的优势, 在复杂目标区断面成像清晰, 地层信噪比及分辨率更高, 内幕同相轴更加连续, 地层与断裂接触关系清晰, 尤其在陡倾角地层与基底之间内幕边界明确, 有利于后续构造研究。从图 12 可以看出, 单方位的地震资料目标区信噪比均值在 3 db 左右, 而双方位联合成像结果目标区信噪比均值在 4 db 以上, 地震资料信噪比提升明显, 有利于后续地层接触关系和沉积体内部构造反射特征地识别。

4 结论

陆丰凹陷 A 洼中深层构造复杂, 双方位资料综合不同方位采集资料的优势, 丰富复杂断裂带的地震波场照明信息, 为后续处理提供高品质原始资料。

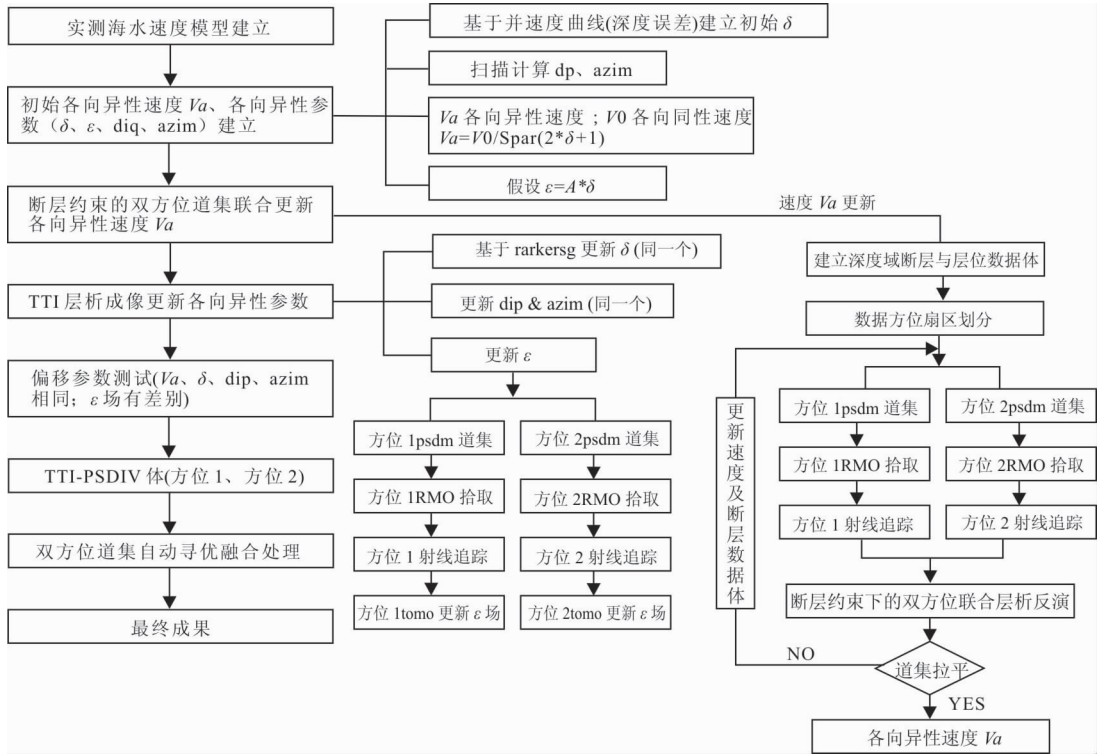


图 7 双方位 TTI 联合层析成像技术流程

Fig. 7 Technical process of TTI joint tomographic inversion at dual-azimuth data

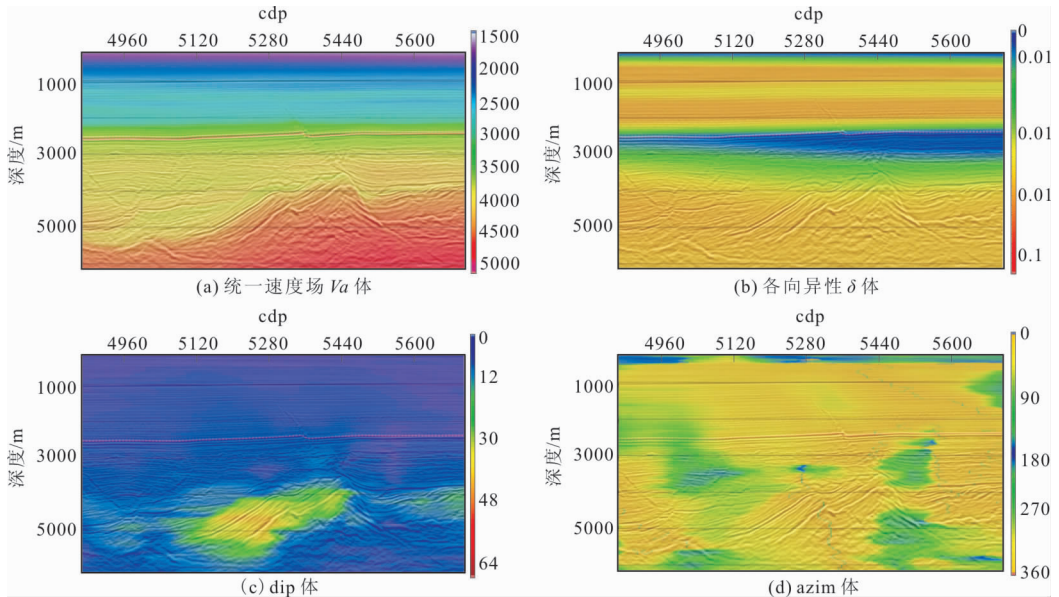


图 8 双方位联合层析反演求取的属性体

Fig. 8 Attributes obtained by joint tomographic inversion of dual-azimuth data

针对双方位资料之间的速度差异及成像差异,笔者采用断层约束的双方位联合速度建模及双方位 TTI 联合建模求取速度模型及各向异性体,提高速度模型的分辨率及精度,速度场更加接近地下介质真实情形,复杂断裂带地层空间位置偏移归位准确,更好

地实现双方位资料的融合成像。实际资料应用证明,双方位资料联合成像有效提高复杂断裂带信噪比,高陡地层与基底之间内幕刻画清晰,有利于识别断裂与地层接触关系,为下一步地质综合研究提供高品质基础资料。

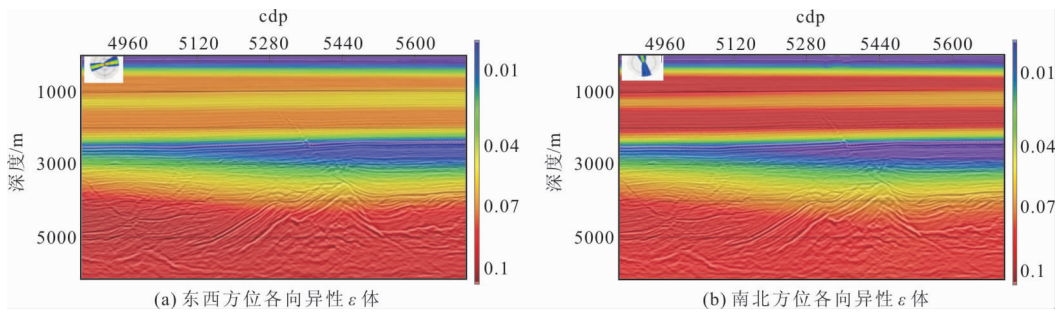
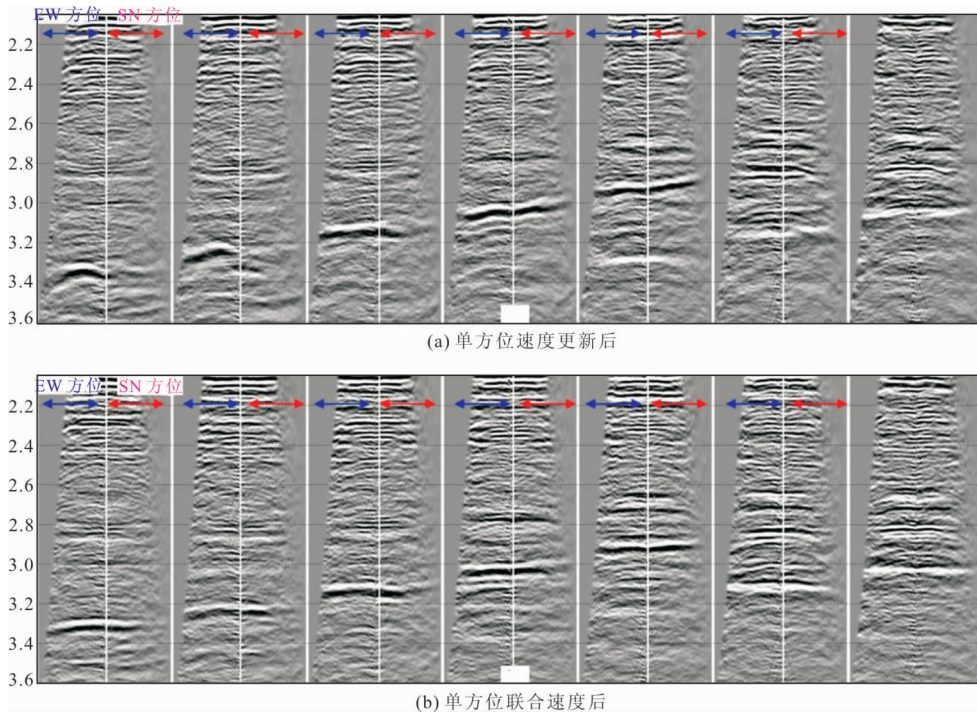
图9 不同方位的各向异性 ϵ 体Fig. 9 Anisotropic ϵ attribute in different azimuth

图10 不同速度偏移道集蝶形显示

Fig. 10 Butterfly display of different velocity offset gathers

参考文献:

[1] 米立军,张向涛,陈维涛,等. 珠江口盆地珠一坳陷古近系油气富集规律及下一步勘探策略[J]. 中国海上油气, 2018, 30(6): 1-13.

MI L J, ZHANG X T, CHEN W T, et al. The law of oil and gas enrichment in the Pearl River basin and the lower Pearl River depression[J]. China offshore oil and gas, 2018, 30 (06): 1-13. (In Chinese)

[2] 米立军,张向涛,汪旭东,等. 陆丰凹陷古近系构造沉积差异性及其对油气成藏的控制[J]. 中国海上油气, 2018, 30(5): 1-10.

MI L J, ZHANG X T, WANG X D, et al. Tectonic and sedimentary differences of Paleogene and their control on hydrocarbon accumulation in Lufeng sag, Pearl River Mouth basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(5): 1-10. (In Chinese)

[3] YIDING D, ZICHENG N, XUDONG W, et al. Difference of oil and gas enrichment law between Paleogene and Neogene in Lufeng sag of Pearl River Mouth basin and its main controlling factors[J]. Journal of petroleum, 2019, 40 (Supplement 1): 41-52.

[4] NIU Z, LIU G, GE J, et al. Geochemical characteristics and depositional environment of Paleogene lacustrine

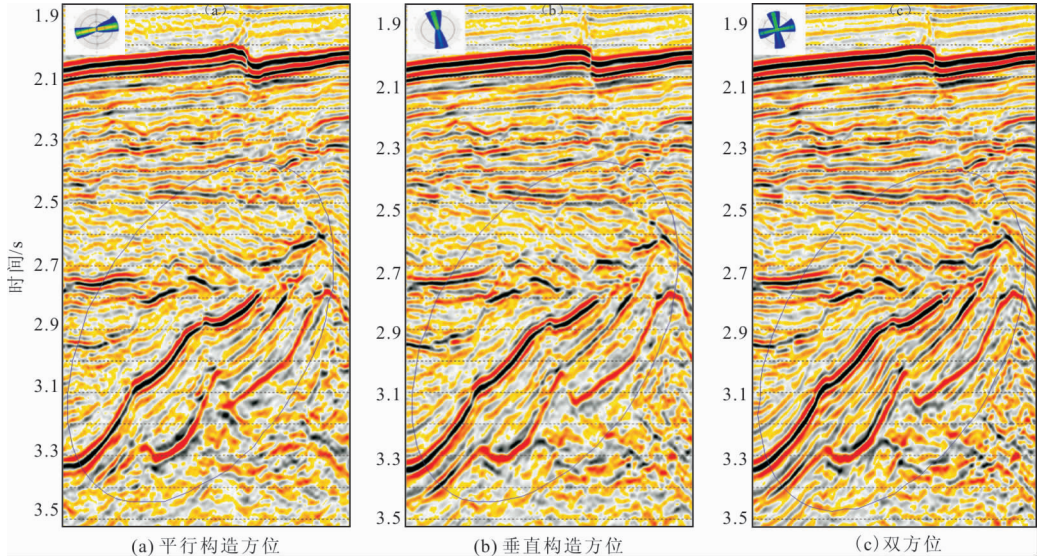


图 11 单方位与双方位资料成像对比

Fig. 11 Imaging comparison of unidirectional and bidirectional data

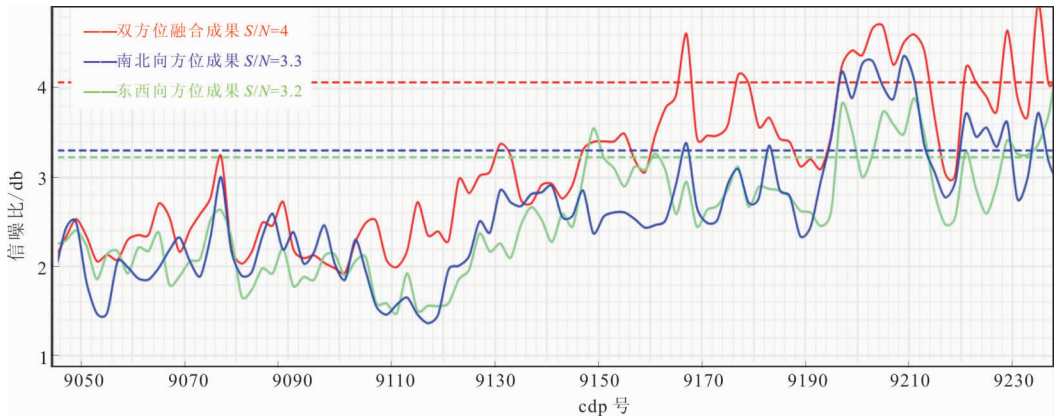


图 12 单方位与双方位资料信噪比对比分析图

Fig. 12 S/N comparison between unidirectional and bidirectional data

source rocks in the Lufeng Sag, Pearl river Mouth basin, South China sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 171: 60-77.

- [5] 刘军,蔡哲,庞雄奇,等.珠江口盆地陆丰凹陷古近系多动力—多期次—多要素复合成藏区定量预测与评价[J/OL]. 地球科学, 2022. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220715.1331.008.html>.

LIU J, CAI Z, PANG X Q, et al. Quantitative prediction and evaluation of Paleogene multi-dynamic-multi-factor composite reservoir forming area in Lufeng sag, Pearl River Mouth basin[J/OL]. Earth science, 2022. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220715.1331.008.html>. (In Chinese)

- [6] 邓勇,李添才,朱江梅,等.南海西部海域油气地球物理勘探中地震处理技术新进展[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(1): 149-156.

DENG Y, LI T C, ZHU J M, et al. Progress of seismic data processing technology in western south china sea[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(1): 149-156. (In Chinese)

- [7] 凌云,高军,孙德胜,等.宽/窄方位角勘探实例分析与评价(一)[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(3): 305-308.

LING Y, GAO J, SUN D S, et al. Case analysis and evaluation of wide/narrow azimuth exploration(one)[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(3): 305-

308. (In Chinese)
- [8] 凌云,吴琳,陈波,等.宽/窄方位角勘探实例分析与评价(二)[J].石油地球物理勘探,2005,40(4):423—427.
LING Y, WU L, CHEN B, et al. Case analysis and evaluation of wide / narrow azimuth exploration(two)[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(4): 423—427. (In Chinese)
- [9] 谢玉洪,李列,袁全社.海上宽频地震勘探技术在琼东南盆地深水区的应用[J].石油地球物理勘探,2012,47(3):430—435.
XIE Y H, LI L, YUAN Q S. Broad band marine seismic exploration in Qiongdongnan Basin deep water areas[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(3): 430—435. (In Chinese)
- [10] 余本善,孙乃达.海上宽频地震采集技术新进展[J].石油科技论坛,2015,34(1):41—45.
YU B S, SUN N D. Latest development of marine broadband seismic acquisition technology[J]. Oil Forum, 2015, 34(1): 41—45. (In Chinese)
- [11] 王汉闯,陶春辉,陈生昌,等.基于稀疏约束的地震数据高效采集方法理论研究[J].地球物理学报,2016,59(11):4246—4265.
WANG H C, TAO C H, CHEN S C, et al. Study on highly efficient seismic data acquisition method and theory based on sparsity constraint[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(11): 4246—4265. (In Chinese)
- [12] 李三福,帅鹏宇,刘杰明,等.南海北部深水坡折带双方位地震采集设计与应用[J].工程地球物理学报,2017,14(2):153—158.
LI S F, SHUAI P Y, LIU J M, et al. The design of dual azimuth marine seismic acquisition and its application to deep-water slope area in Northern South China sea[J]. Chinese Journal Of Engineering Geophysical, 2017, 14(2): 153—158. (In Chinese)
- [13] TSVANKIN L. Anisotropic parameters and P-wave velocity for orthorhombic media[J]. Geophysics, 1997, 62(4):1292—1309.
- [14] GRECHKA V, TSVANKIN L. Seismology of azimuthally anisotropic media and seismic fracture characterization[J]. Leading Edge, 2011, 10(3):154—155.
- [15] XIE Y, BIRDUS S, SUN J, et al. Prestack depth imaging of multi azimuth seismic data in the presence of orthorhombic anisotropy [J]. A Seg Extended Abstracts, 2012(1):1—4.
- [16] 谢涛,邱铁成.双方位地震资料处理技术及在M区块的应用[J].工程地球物理学报,2019,16(3):329—333.
XIE T, QIU T C. Dual azimuth seismic processing technology and Its application to M block[J]. Chinese journal of engineering geophysical, 2019, 16(3): 329—333. (In Chinese)
- [17] 朱明,何敏,张振波,等.海上二次三维双方位地震资料联合成像[J].中国海上油气,2016,28(6):15—20.
ZHU M, HE M, ZHANG Z B, et al. Combined imaging of offshore second two-azimuth 3D seismic data[J]. China offshore Oil and Gas, 2016, 28(6): 15—20. (In Chinese)
- [18] 胡高伟,邓勇,潘光超,等.双方位、高密度地震资料在文昌凹陷勘探中的应用[J].地球物理学进展,2019,34(6):2444—2450.
HU G W, DENG Y, PAN G C, et al. Application of two-azimuth and high-density 3D seismic data in the exploration of Wenchang depression [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(6): 2444—2450. (In Chinese)
- [19] 罗小明,王世瑞.纵波 VTI 介质各向异性参数的求取[J].物探与化探,2006,30(3):233—235.
LUO X M, WANG S R. Estimation of anisotropy parameters in VTI media using surface P wave data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 30(3): 233—235. (In Chinese)
- [20] 刘畅,李振春,曲英铭,等.地震层析成像方法综述[J].物探与化探,2020,44(2):227—234.
LIU C, LI Z C, QU Y M, et al. A review of seismic tomography methods[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(2): 227—234. (In Chinese)
- [21] 刘杰明,孙博,李三福.基于井控地质约束的陵水宝岛凹陷各向异性参数反演与分析[J].物探化探计算技术,2021,43(4):413—419.

LIU J M, SUN B, LI S F. Inversion and analysis of anisotropic parameters in Lingshui baodao sag based on well control geological constraints [J]. Computing

Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 43(4): 413–419. (In Chinese)

Research on joint tomographic of the complex fault zone in lufeng sag on dual—azimuth seismic data

JIANG Yazhou, DU Junfeng

(Institute of Geophysical Exploration, Geophysical—China Oilfield Services Limit, Zhanjiang 524057, China)

Abstract: The working area of A hollow in Lufeng Sag is small, and the oil—gas reserves are rich. The resolution of the original seismic data is low, and after multiple reprocessing, the contact relationship of the target layer is difficult to determine. The imaging of complex fault zones and the high—dip—angle basement is fuzzy, which is challenging to meet the exploration needs. Therefore, the second three—dimensional seismic data acquisition is carried out in this area, and the acquisition azimuth is orthogonal. Given the three—dimensional seismic data collected in different directions in the same block, the difference of seismic data in different directions is analyzed, and the combined tomography inversion technology with fault constraint is proposed to obtain the velocity field with higher accuracy. Through the dip angle and azimuth attribute of TTI anisotropy, the coaxial dislocation of steep dip strata in different azimuth data is solved, the migration and positioning accuracy is improved, and the fusion imaging of two—dimensional data is better realized. The imaging quality of Paleogene steep dip strata is improved, stratigraphic continuity—ties, the signal to—noise ratio is higher, which provides reliable basic data for subsequent geological evaluation.

Keywords: lufeng sag; complex fault zone; dual—azimuth seismic data; fault—constrained tomography; TTI anisotropy