

王腊梅, 涂齐催, 毛云新, 等. 断层阴影区地震优势信号提取新技术及其在西湖 TT 区的应用[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(2): 68-76.

WANG Lamei, TU Qicui, MAO Yunxin, et al. A new technique for seismic dominant signal extraction in fault shadow zone and its application in TT Block, Xihu Sag, East China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(2): 68-76.

断层阴影区地震优势信号提取新技术及其在西湖 TT 区的应用

王腊梅, 涂齐催, 毛云新, 娄敏*

(中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335)

摘要:在复杂断块地区,地震成像受断层的影响,断层下盘同相轴出现“上拉”、“下拉”或者同相轴错断的现象,极大地影响了断层圈闭构造高点的确定以及圈闭幅度的准确判断。开展针对复杂断层的高精度速度建模和高精度成像技术被认为是解决断层阴影区成像的主要处理技术解决方案。立足于地震采集信号自身的属性信息,充分挖掘地震信号的潜力,提出广角反射的折射线性去噪技术、中低频有效信号提取技术和优势信号精细速度建模技术,在西湖 TT 区目标评价中取得了良好的效果,明显减低了断层阴影对目标构造形态的影响,提高了构造圈闭定位的准确性。应用结果表明:通过准确的 PSDM 速度模型结合断层阴影区优势信号的提取,获得更聚焦的反射能量,断层阴影区弱振幅区得到消除,有效改善了断裂阴影区的成像效果。

关键词:断层阴影; 优势信号; 速度建模; 成像; 断层圈闭

中图分类号:P714; P315.9

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.029

0 引言

构造落实对于圈闭的刻画具有重要意义,但是断层阴影区构造往往较难预测,给油气勘探开发带来了极大的不确定性^[1-6]。随着勘探开发进入中后期,低幅、复杂断块等构造逐渐成为“增储上产”的重点研究目标,精细构造落实及圈闭的准确描述是物探技术的基本要求^[7-8]。在地震采集方位角较小的条件下,复杂断块区域速度场受断层影响明显,成像效果差,断层下盘阴影区域地震成像信噪比低、同相轴产状畸变以及能量显著减弱的现象明显,断层下盘获得准确地震成像对构造形态的精确认识、

构造高点的确定及圈闭幅度的准确判断具有重要意义。

在断裂发育区,地震处理中往往不能体现断裂上下盘速度突变,受速度的影响,地震反射界面与实际地层界面相比,就会出现“上拉”或“下拉”等现象。对此类断层下盘不确定的“上拉”或“下拉”地震成像畸变现象常称为断层阴影^[1]。当正断层上盘地层速度小于对接盘地层速度时,对接部分下伏地层地震同相轴会产生“下拉”畸变;而逆断层上盘地层速度大于对接盘地层速度时,对接部分下伏地层会产生“上拉”畸变^[9]。地震速度不准确造成阴影带的原因主要有 2 点:①采集因素方面,窄方位地震采集波场信息不够丰富、横向覆盖次数低而导致的地震成像质量差;②处理因素方面,断层附近成像速度不易准确拾取。针对断层成像,前人多从地震正演^[10-11]、全方位地震联合成像^[12-16]和全波形反演和层析速度建模^[17-20]开展断层阴影的恢复。仅依靠地震正演得到的结果多为定性分析,较难得到定量恢复断层阴影畸变量。全方位的三维地震数据有利于获得最准确的波场速度,能够有效拾取

收稿日期: 2023-02-09

资助项目: 中海石油综合科研项目“平湖地区不同级次断层封堵能力定量评价”(CCL2023SHPS003RS/01)

第一作者: 王腊梅(1982—),女,硕士,工程师,主要从事石油地球物理勘探开发方面的研究工作。E-mail: wanglm26@cnoc.com.cn

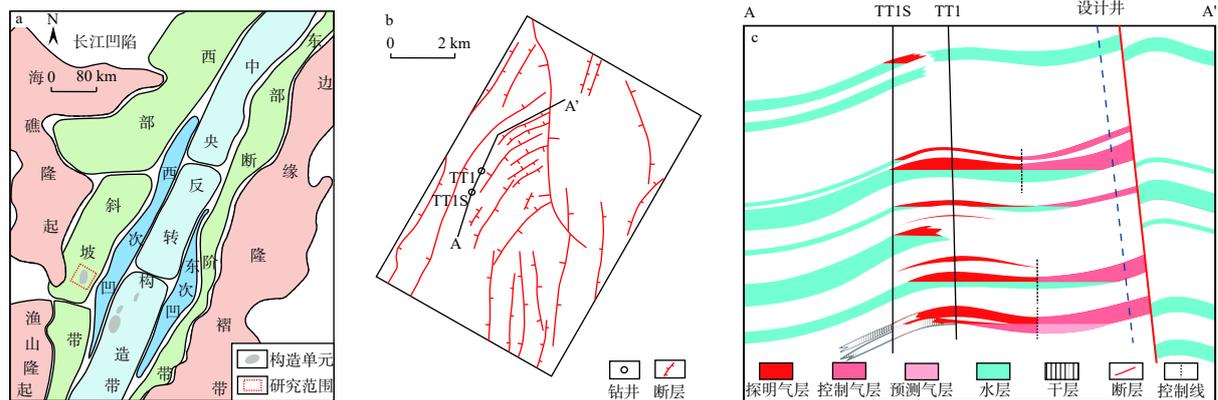
* 通讯作者: 娄敏(1993—),男,硕士,工程师,主要从事地震解释和储层方面的研究工作。E-mail: loumin2@cnoc.com.cn

断层上下盘准确速度,但全方位地震资料的采集要求较高,并非所有工区均有全方位地震资料。而非全方位地震资料,近垂直于断层采集的数据能够解决断层下盘的成像,断层阴影现象不明显;当采集方位与断层走向平行或者呈小角度斜交时,横向覆盖次数较低,造成照明不充分和反射面源间距大的问题。同时,断层对中高频率地震信号的衰减、屏蔽影响,断层下盘信噪比大幅度降低。照明不充分和屏蔽影响,造成了下盘速度精确拾取的难度大,特别是上下盘速度差异较大时,常常会出现断层阴影的问题。

采集和处理是解决复杂构造区准确成像的两大关键因素。通过针对性重处理可以有效改善地震资料分析断层阴影的问题。可靠的地震信号、精细速度模型是保证最终断层阴影区成像效果的根本因素。本文通过充分挖掘拖缆采集地震数据的潜力,对现有的三维地震数据进行优势信号提取,利用低频信号更好的地层穿透性和对各向异性的适应性特征,最大化保护好中低频有效反射信号,提取大入射角范围内的有效反射地震信号,以最优信噪比数据作为优势信号开展精细速度建模,获得真实的地震数据信号,从地震数据源头改善了断层阴影区成像质量,有效提高了构造预测精度,进一步推动了含油气构造圈闭的落实和评价。

1 TT 区块勘探开发现状及存在问题

研究区位于东海陆架盆地西部斜坡带,经过近 40 年勘探开发目前处于开发中后期,亟需滚动拓边寻找接替储量。TT 区块为受 3 个断层夹持的复杂断块构造,低幅度鞍部被分割为南北 2 个高点,其中,南高点已钻井 2 口,目的层油气显示活跃,高部位油气层厚度显著增加,气层受构造控制明显(图 1)。向北低幅度鞍部紧邻顺向深大断裂下盘,由于受到断层阴影区的影响,地震剖面近断层位置存在明显的构造畸变,北部目标圈闭难以落实。此外,研究区地震资料为 2007 年常规拖缆采集,采集时间早,采集参数见表 1。该资料对构造的落实具有一定的局限性,主要表现在:①2007 年地震数据采集应用双源八缆观测系统,采集方位与控断断层走向为小角度斜交,断层下盘信号照明明显不足;②目的层埋深较深,地下面元横向 1 次覆盖,面元之间横向相关性较小,断层下盘成像效果差;③海上地震采集多次波干扰严重且频带较宽,目的层中低频干扰较严重,影响优势信号提取效果及断层下盘的准确成像。本研究通过对地震资料开展重新处理,求取准确速度模型,提高断层发育区地震资料信噪比,消除断层阴影影响,获取准确的断层和地层反射界面,支持复杂断块低幅构造圈闭落实。



(a)研究区位置; (b)研究区钻井分布; (c)油气藏剖面图

图 1 研究区油气藏剖面图

Fig.1 Reservoir profiles of the study area

表 1 地震采集参数

Table 1 Seismic acquisition parameters

测线方向	电缆长度	记录道数	电缆间距/m	最大纵向炮检距/m	最大横向炮检距/m	纵横比	纵向覆盖次数	横向覆盖次数	气枪深度/m	电缆深度/m
30/210°	5 000 m/缆, 共8缆	398道/缆, 共8缆	75	5 200	270	0.05	50	1	5	6

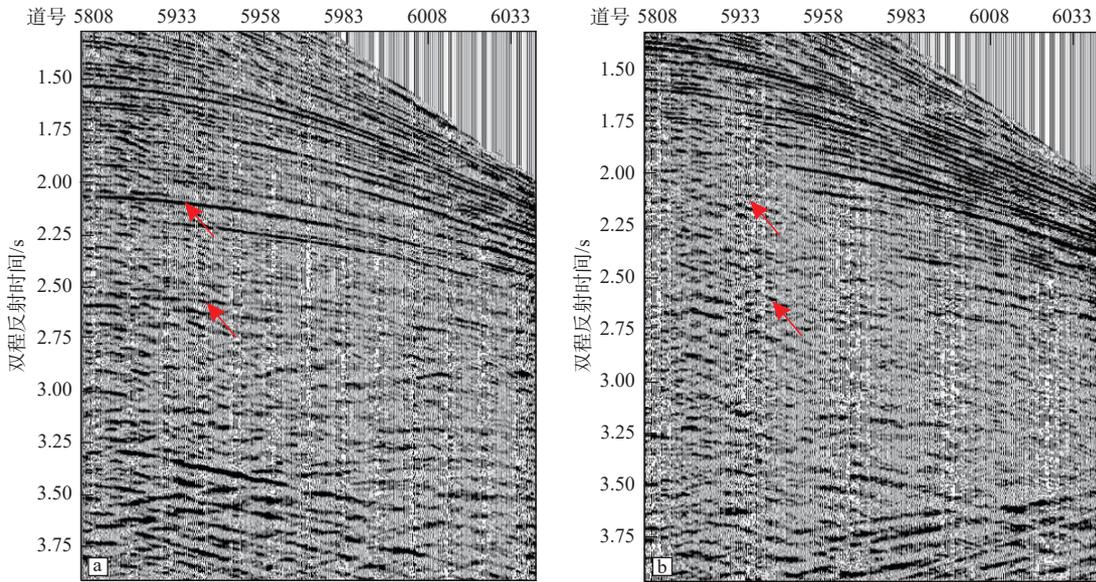
2 断层阴影区的处理关键技术

常规海洋拖缆采集是一种相对窄方位的观测系统。当地下构造复杂多变时,窄方位采集观测系统无法兼顾到每个构造单元获得理想的信号^[15]。尤其是平行断层采集时,观测系统不利于断面波信息的接收,使得地震波在断层上盘获得的反射信号与断层下盘获得的反射信号差异明显(图2)。对现有的三维地震数据消除断层阴影的关键技术指标包括:有效信号保护和优势信号提取;获得断层阴影区信号的信噪比提高;有效提高速度谱质量;增加速度模型拾取精度及偏移成像的准确度;淡化断层阴影区成像与周边地层成像的明显界限。基于

地震数据来消除或者弱化断层阴影区成像效果的地震处理技术主要有大入射角区折射线性去噪技术、弱反射信号保护技术和优势信号精细速度建模技术等,以上技术的发展对后续气田的调整挖潜研究有重要意义。

2.1 折射线性干扰压制技术

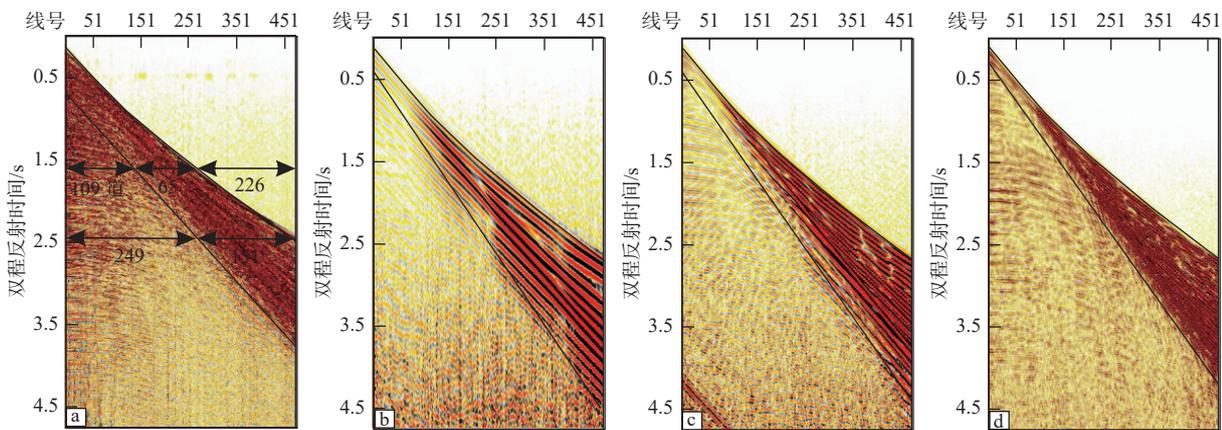
西湖地区拖缆采集地震资料噪声类型基本相似,原始单炮大入射角范围内受折射干扰影响较为严重。不同电缆长度的原始单炮其折射噪声在不同频带内所覆盖的区域存在差异。如图3所示,本区原始单炮全频带的折射线性干扰区与其他3个频段的特征及范围存在明显差异,低频端干扰影响面积最大。



(a)断层上盘去噪后单炮; (b)断层下盘去噪后单炮

图2 跨越不同构造单元原始单炮品质差异

Fig.2 Differences in quality of original single shot across different structural units



(a)全频带; (b)4~8 Hz; (c)8~16 Hz; (d)16~32 Hz

图3 折射线性发育区不同频带范围内信噪比分析

Fig.3 Signal-to-noise ratio analysis in different band ranges in refractive linear development area

处理过程中结合电缆长度的资料特点, 首先采取细分频率的分析方式, 分析不同频带范围内折射干扰的特征及分布范围, 提高对有效信号与折射干扰信号的识别准确度。然后, 基于视速度差异, 采用分频、分区高分辨率稀疏 Tau-P 反演实现对折射线性干扰最好的压制效果。该技术获得了大入射角范围内的有效信号能量, 增加了远道地震信号的有效性, 提高了远道地震信号的信噪比, 并较好地保护了道集数据的地震反射振幅随炮检距变化(AVO)

反射特征(图 4)。该项技术应用充分挖掘了地震数据潜力, 为精细速度建模拾取奠定基础。

2.2 弱反射信号保护技术

弱反射信号保护技术是基于对研究区内或者临近区内的钻井资料进行模型正演, 提取不同主频的合成记录开展对可靠反射层位的认识和标定, 获得对断层阴影区及阴影区外地层反射信号的认识。图 5 为断层阴影区原始单炮与低频 3~10 Hz 频带

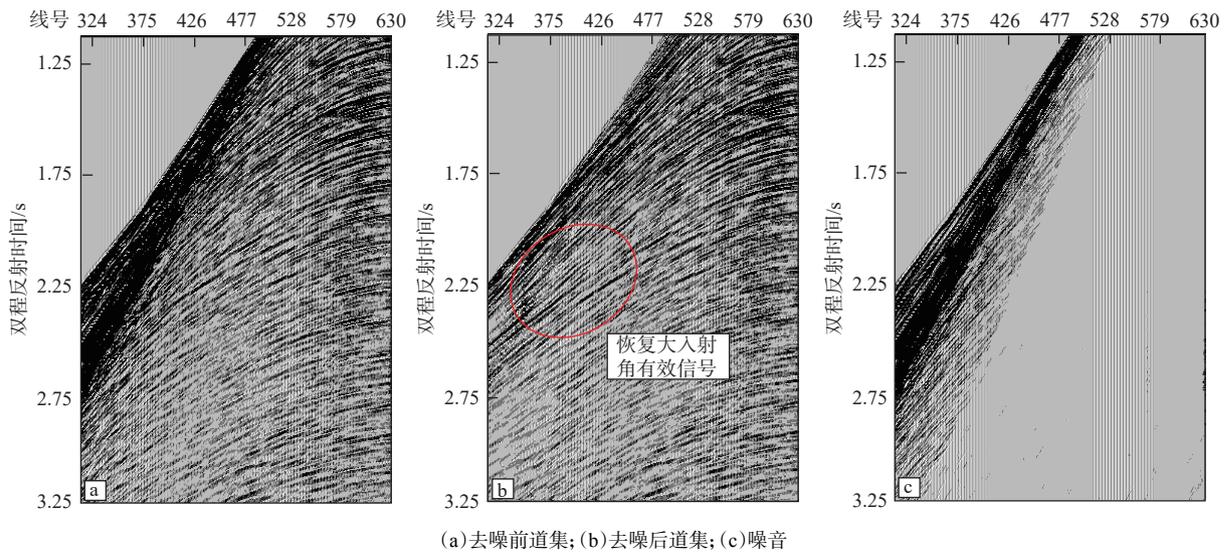


图 4 大入射角区折射干扰波压制技术

Fig.4 Suppression technology for wide-angle refractive interference waves in high incidence angle region

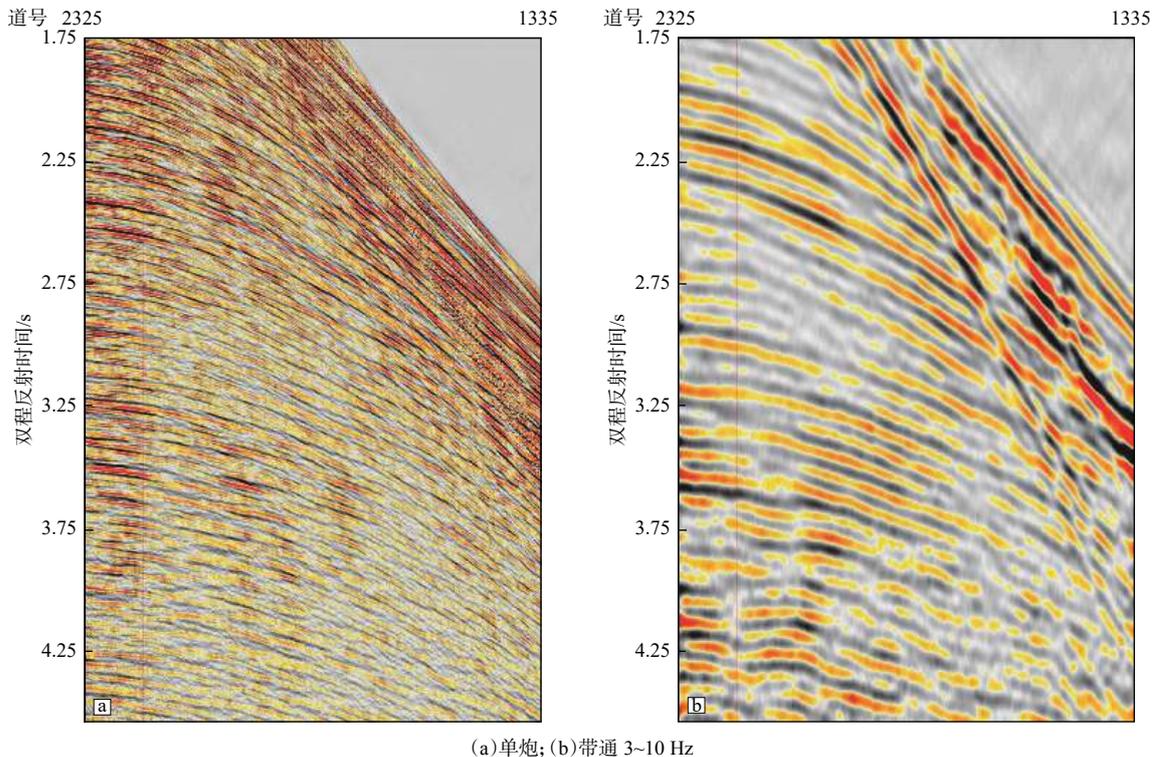


图 5 断层阴影区全频单炮与带通 3~10 Hz 对比

Fig.5 Comparison of full-frequency single gun and bandpass 3~10 Hz in the shadow area of the fault

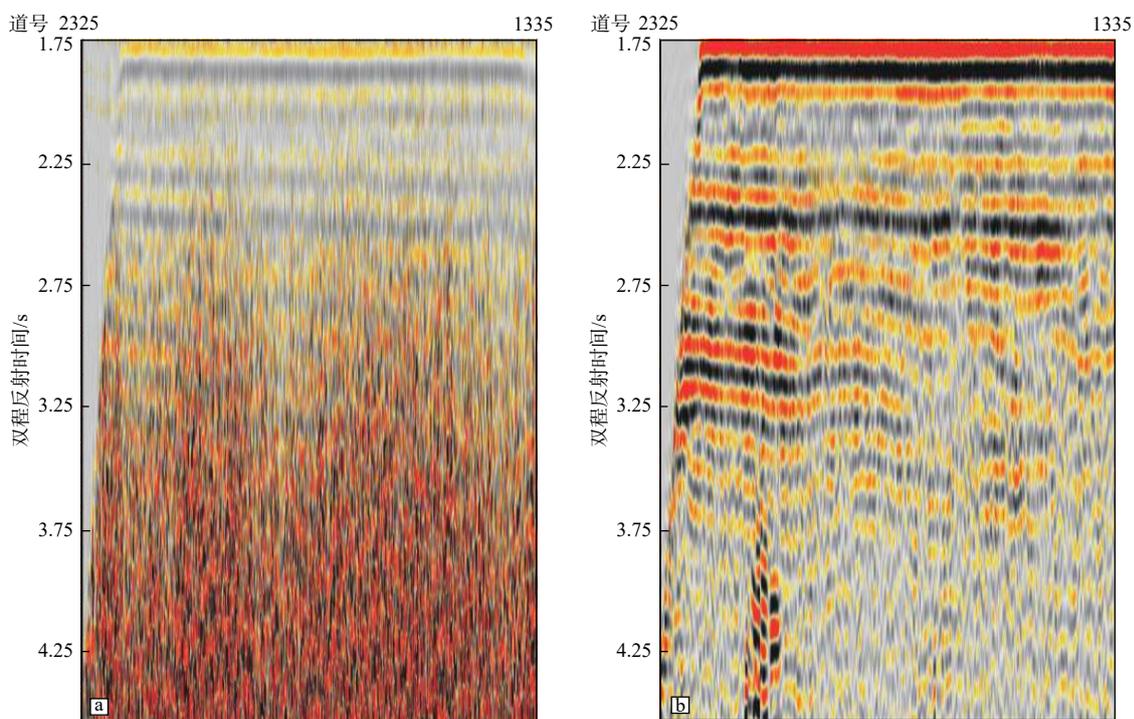
内单炮对比,可以看到断层发育区原始单炮信噪比较低,但低频端有效地震反射特征更加清楚,能量的空间一致性特征更好。因此,需要在处理环节重视对低频率弱反射有效反射的保护,充分利用中低频端反射信号获得对断层阴影区构造的准确认识。在干扰波压制过程中,采取“六分法”叠前去噪手段,通过分区、分域、分步、分类、分频、分时,准确识别有效反射地震信号,用可靠信噪比进行频率约束,完成每个频带范围内的信噪分离,输出每一种噪音,避免在去噪的过程中损失有效信号。考虑地震低频反射信号具有较好的地层穿透性和对各向异性的适应性,提高断层阴影区地震资料的信噪比,在涌浪干扰压制、鬼波压制、多次波压制等技术应用过程中,都高度重视低频端有效信号与低频干扰的有效分离,采取精细质控方式,用优势信噪比约束对低频端信号的保护和干扰的剔除,用分频叠加质控约束单炮或者道集的去噪效果,真正实现了对低频率弱反射有效信号的极大保护(图6)。

2.3 优势信号精细速度建模技术

通过对中低频端干扰波的有效净化及折射线性区有效的信噪分离,提高了中低频端和远炮检距地震资料的信噪比。在宽频处理数据的速度建模过程中,针对断层阴影区开展信噪比统计,优选信

噪比较高的优势频段(一般介于4~20 Hz),提取优势信号提高断层阴影区资料信噪比,缩小阴影区与其以外区域地震信号的特征差异,从而提高断层阴影区速度谱质量和剩余校正(RMO)速度拾取效果。在此基础上,开展多信息约束的高分辨率网格层析反演叠前深度偏移速度建模,求取高精度的叠前深度偏移(PSDM)速度模型,并引入倾斜横向各向同性(TTI)各向异性场,获得对共反射点(CRP)道集远炮检距更好的拉平效果,消除成像深度误差,最终获得断层阴影区成像效果的改善,消除或者弱化断层阴影区与周边地层的明显界限,实现对断层下降盘构造的准确认识。通过对比常规速度建模与优势信号速度建模(图7)可知,优势信号提取技术应用后道集、速度谱质量明显提高,速度准确性的提高获得了成像效果的明显改善。利用优势信号获得的速度模型趋势与深度域剖面宏观构造变化趋势一致。同时,速度色标比较柔和,表明基于地震优势信号的网格层析,速度没有异常,速度模型更加准确(图8)。

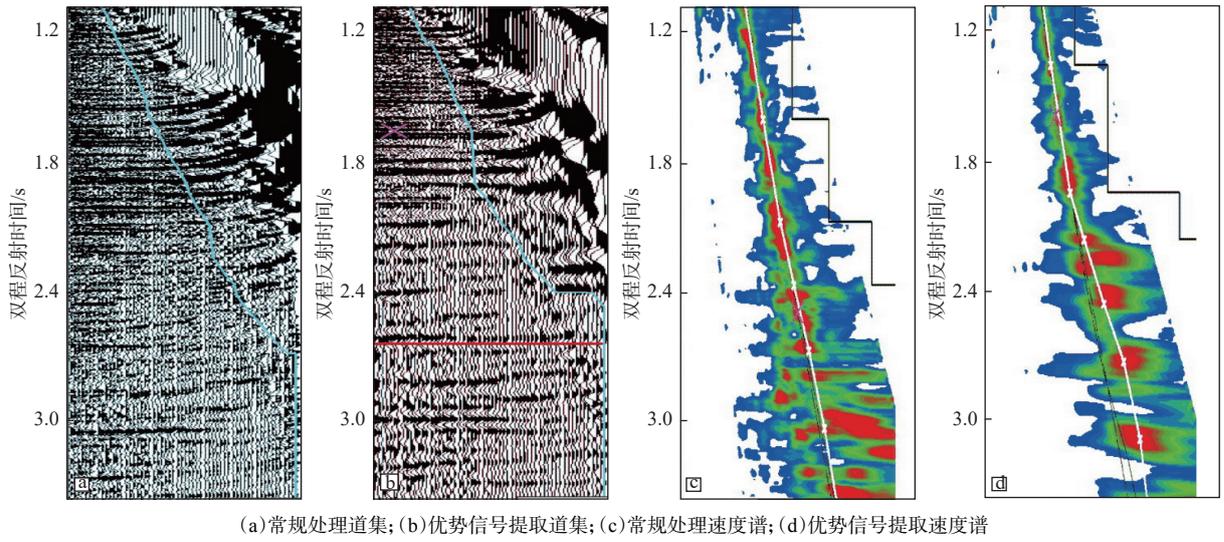
通过准确的 PSDM 速度模型结合断层阴影区优势信号的提取,获得了断层阴影区内地层的可靠成像,断层阴影区弱振幅区得到消除,断点清晰,断层两翼地层接触合理,成像效果得到了明显改善(图9)。



(a)去噪前;(b)去噪后

图6 低通4 Hz去噪前、后叠加对比

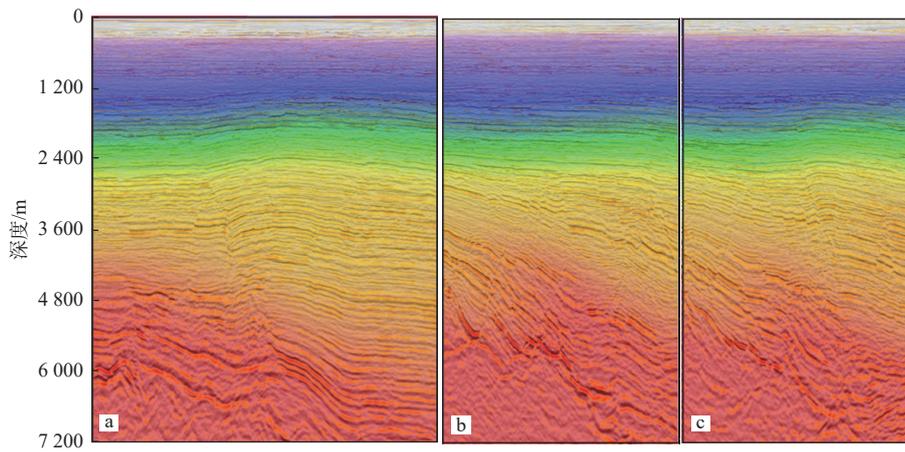
Fig.6 Overlay comparison before (a) and after (b) low-pass 4 Hz denoising



(a)常规处理道集; (b)优势信号提取道集; (c)常规处理速度谱; (d)优势信号提取速度谱

图 7 常规方法及基于优势信号获得的道集和速度谱

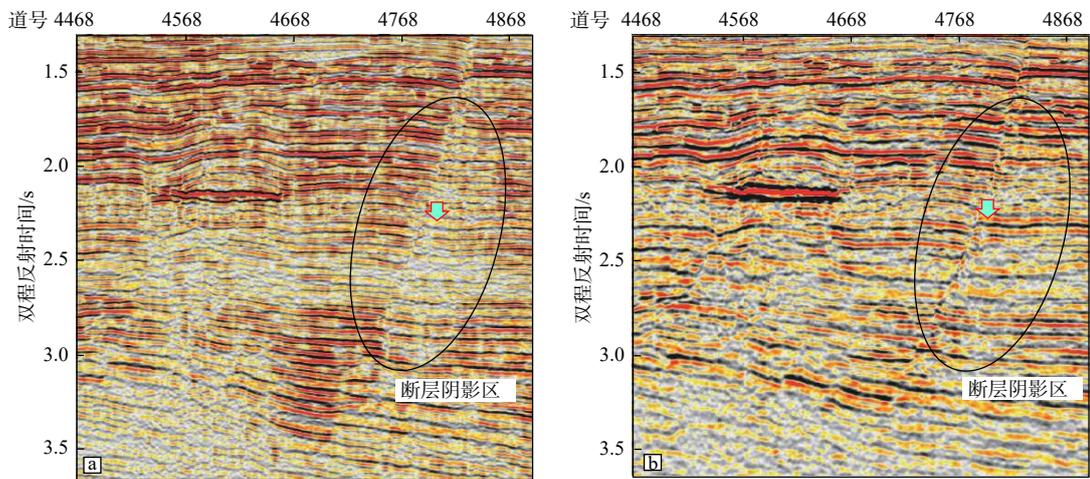
Fig.7 Conventional methods and advantageous signal extraction technique applied to velocity modeling



(a)线号 5580; (b)道号 4470; (c)道号 4680

图 8 深度域构造与层速度叠合剖面

Fig.8 Depth domain structure and layer velocity superposition profiles



(a)处理前; (b)处理后

图 9 本次处理结果与原处理结果在断层阴影区成像效果的改进

Fig.9 Improvement of the imaging effect in shadow area of fault between the results of this processing and the old results

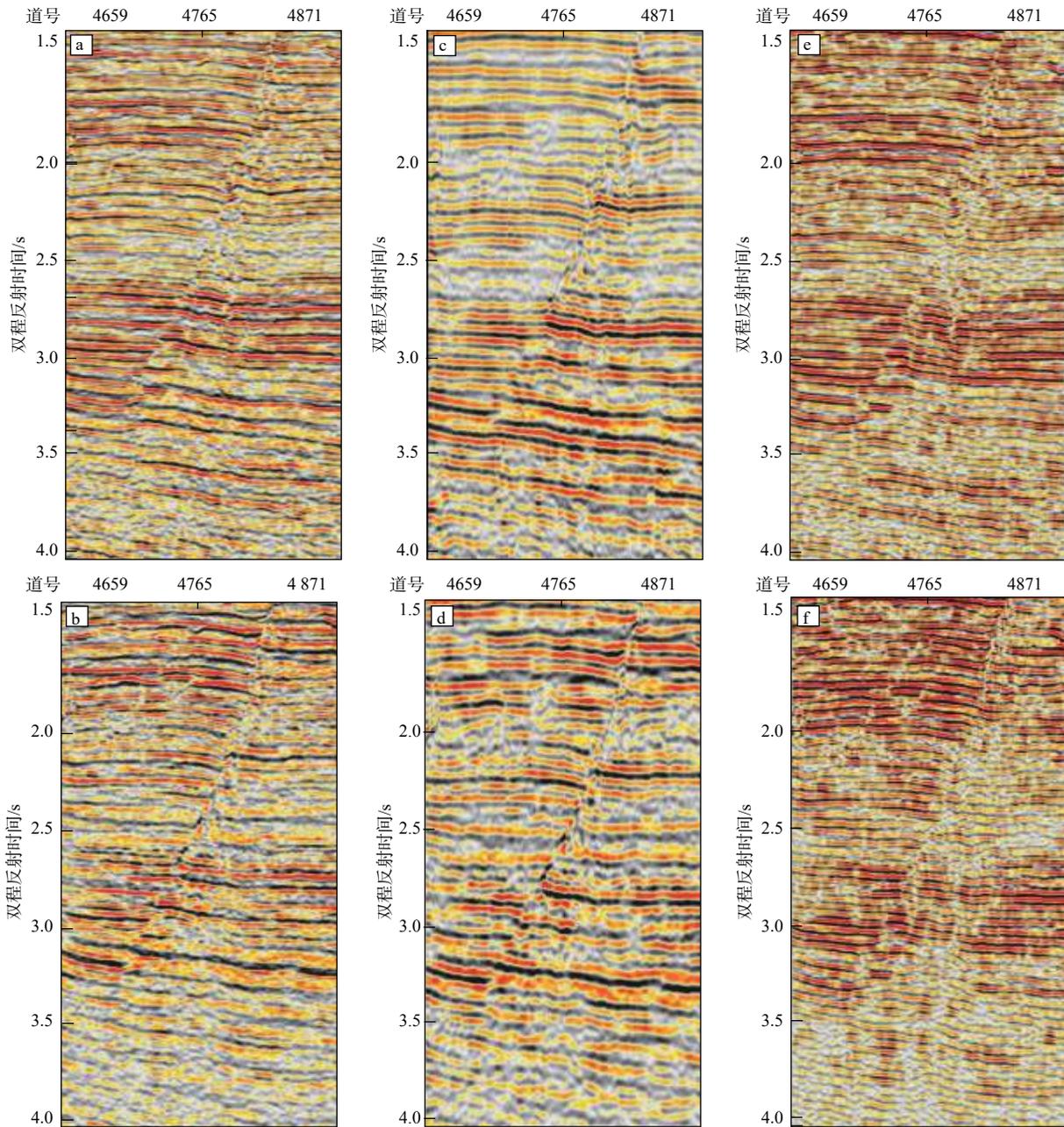
3 应用效果分析

3.1 成像效果得到明显改善

如图 10 所示, 20 Hz 以内低通滤波后的新老资料基本一致, 在断层附近均获得较好成像, 而 20~60 Hz 高频部分在断层下盘存在差异。通过全频段和不同的频率成分剖面对比, 表明此次处理获得了偏移剖面较好的能量聚焦, 速度较为可靠。

3.2 断层阴影区构造得到可靠落实, 支持井位部署工作开展

通过应用地震优势信号提取技术改善了断层阴影带的成像, 断裂及目的层反射更加清楚, TT1 井区以北构造鞍部特征明显, 构造北部高点发育得到证实, 成藏概率大, 是下一步开发评价的重点潜力目标, 进一步验证了井位目标的落实 (图 11)。



(a)处理前全频段; (b)处理后全频段; (c)处理前低通 20 Hz; (d)处理后低通 20 Hz; (e)处理前 20-60Hz; (f)处理后 20-60 Hz

图 10 全频段和不同的频率成分新老剖面对比

Fig.10 Comparison between old and new profiles for full frequency band and different frequency components

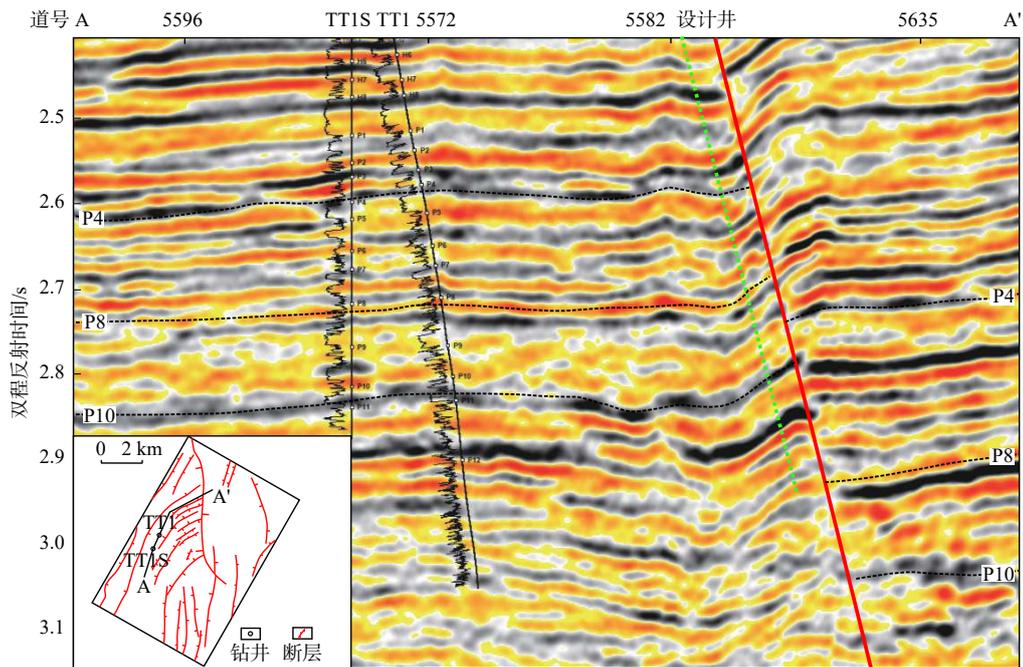


图 11 过已钻井和设计井常规地震剖面

Fig.11 Seismic profile through drilled wells and design wells

4 结论

(1) 针对 TT 区块断裂复杂、存在断层阴影影响的资料特点, 采取优势信号识别及有效信噪分离及精细速度建模等处理手段, 形成了断层阴影区地震优势信号提取技术体系, 较好地改善了断层阴影区成像效果, 提高了断层阴影区的构造解释精度, 为后续气田的调整挖潜研究提供了高品质的地震资料。同时, 落实了 TT 区北部构造, 可为油气田下一步滚动挖潜和综合调整提供参考。

(2) 优势信号提取技术相比于宽方位采集和先进的成像技术解决阴影区构造问题, 具有成本低、见效快、易操作的优势。对原始地震数据潜力评价具有客观性, 对重新部署采集提供有效参考的对比依据, 对先进的偏移算法成像效果具有较好的对比性。针对既缺乏宽方位数据又需要改善断层阴影区成像效果的地区提供了新的处理思路, 具有较大的技术借鉴意义。

参考文献:

[1] STUART F, 赵改善. 断层阴影问题: 机理与消除方法[J]. 石油物探译丛, 1997, 9(2): 51-55.
 [2] 陈祖银, 张霞, 邓海东, 等. 断层阴影识别技术研究及应用效果分析[J]. 物探化探计算技术, 2021, 43(5): 579-583.
 [3] 侯凯, 熊书权, 杨天笑, 等. 南海东部某油田地震成像畸变下的构造恢复[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(5): 76-84.

[4] 姜岩, 程顺国, 王元波, 等. 大庆长垣油田断层阴影地震正演模拟及校正方法[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(2): 320-329.
 [5] 刘南, 李熙盛, 侯月明, 等. 模型正演在断层阴影带内构造研究中的作用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(5): 65-74.
 [6] 宋亚民, 戴朝强, 姜建, 等. 南海东部地区断层阴影带构造落实方法及其应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2021, 43(3): 296-303.
 [7] 涂齐催, 姜敏, 毛云新, 等. 基于构造-流体耦合约束的变速成图方法及其在东海A气田挖潜阶段的成功应用[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(12): 56-63.
 [8] 汪生好, 李黎, 蒋玉婷, 等. 少井条件下低缓畸变构造精细研究及油气勘探启示[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(6): 63-69.
 [9] 白海军, 程学欢, 赵超, 等. 珠江口盆地珠一坳陷断层阴影带成像技术与实践[J]. 石油物探, 2022, 61(2): 329-338.
 [10] 宋亚民, 戴朝强, 张丽萍, 等. 恩平凹陷南部斜坡断层阴影带构造恢复方法研究[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(6): 2194-2202.
 [11] 孙维昭, 王中凡, 张智. 断层阴影的正演模拟、识别与校正: 以尼日尔Termit盆地为例[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(4): 1593-1604.
 [12] 白海军, 袁阳, 杨登峰, 等. 海上三维双方位融合处理技术在番禺4洼的应用[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(3): 82-88.
 [13] 张振波, 罗伟. 拖缆宽方位与双方位效果分析[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(3): 66-73.
 [14] 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.
 [15] 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.

- [16] 朱江梅, 李列, 杨薇, 等. 多方位角地震资料在文昌凹陷勘探开发中的应用分析[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(5): 2587-2596.
- [17] 胡光辉, 李熙盛, 郭丽, 等. 构造约束全波形反演及其海上资料应用[J]. 石油物探, 2018, 57(4): 592-596.
- [18] 李黎, 沈水荣, 吴意明, 等. 全波形反演与断层层析反演联合速度建模: 以南海东部A油田为例[J]. 中国海上油气, 2020, 32(5): 107-113.
- [19] 张在金, 陈可洋, 范兴才, 等. 井控与构造约束条件下的网格层析速度建模技术及应用[J]. 石油物探, 2020, 59(2): 208-217.
- [20] 彭海龙, 邓勇, 赫建伟, 等. 基于断层与层位约束的3D速度建模方法在消除断层阴影中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(6): 2520-2526.

A new technique for seismic dominant signal extraction in fault shadow zone and its application in TT Block, Xihu Sag, East China Sea

WANG Lamei, TU Qicui, MAO Yunxin, LOU Min*
(Shanghai Branch of CNOOC (China) Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: In complex fault block areas, seismic imaging is affected by faults, resulting in the phenomenon of "pull up", "pull down", or displacement of same phase axis in the footwall of the fault, which greatly affects the determination of the structural highs of fault traps and the accurate judgment of trap amplitude. High-precision velocity modeling and high-precision imaging for complex faults were considered the main processing technological solutions for imaging the shadow zones of faults. Based on the attributes of the seismic acquisition signal, we fully explored the potential of seismic signal and proposed techniques for refractive linear denoising for wide angle reflection, the medium- and low-frequency effective signal extraction, and the dominant signal fine velocity modeling, which have achieved good outcome in the target evaluation for the TT area of Xihu Sag in East China Sea, significantly reduced the influence of fault shadow on the target structural morphology and improved the accuracy of fault trap locating. The application results show that by combining accurate PSDM (pre-stack depth migration) velocity model and the extraction of dominant signal of fault shadow zone, more focused reflection energy could be obtained, the weak amplitude zone of the fault shadow zone was eliminated, and the imaging effect of the fault shadow zone was effectively improved.

Key words: fault shadow zone; dominant signal; velocity modeling; imaging; fault trap