

高顺莉. 海洋宽频高精度地震处理技术及其深层岩性勘探实践[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(3): 75-83.

GAO Shunli. Broadband and high-precision seismic processing technology and its application on offshore deep lithology exploration[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(3): 75-83.

海洋宽频高精度地震处理技术及其 深层岩性勘探实践

高顺莉

(中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335)

摘要:近海平缆三维地震资料的宽频高精度处理在岩性油气藏勘探中越来越受到重视,但尚缺少专门分析论述。以东海西湖凹陷西斜坡深层精细岩性勘探为目标,通过发展波动方程延拓迭代减法去除鬼波、叠前综合多域去噪、浅水区组合去多次波,以及基于目标体的精细速度建模和偏移成像等技术手段的综合应用及效果分析,建立了海上平缆三维地震资料的宽频高精度处理技术流程,并将其应用于西湖凹陷西斜坡实际资料处理中,实现高分辨率宽频保幅高精度地震处理。利用宽频资料开展深层岩性油气藏的精细描述,有效实现了油气田增储扩边和深层优质岩性气田新发现,以助力海上深层岩性油气藏勘探开发。

关键词:平缆宽频高精度;地震处理;鬼波去除;浅水多次波组合压制;深层岩性勘探

中图分类号:P744;P738

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.039

0 引言

随着油气田勘探开发难度的增大和地质认识的逐渐加深,对地震资料的要求越来越高,海上三维地震勘探逐渐从常规向宽频保幅高精度资料发展。这一进展首先体现在从地震采集源头上达到宽频的目的,例如近年发展的海上双检、上下缆、斜缆等针对压制接收端鬼波的宽频地震采集技术^[1-3]。双检技术在采集时同时接收水陆检信号,通过地震处理时水陆检合并达到去除接收缆鬼波的目的。上、下缆和斜缆技术利用不同接收缆深条件下信号的差异去除接收缆鬼波,从而拓宽频带,提高资料品质。向宽频发展的第 2 个进展是伴随着地震采集技术而发展起来的系列地震资料处理技术^[4-6],并取得了较好的应用效果^[7-8]。随着宽频采集处理技

术的发展和取得的显著效果,油气田勘探学家们不禁思考一个问题:不通过成本较高的宽频地震采集,而仅仅采用常规的三维平缆采集资料,通过对其进行地震资料宽频处理,能否达到去除鬼波、拓宽频带,从而提高资料分辨率和精度的目的。有学者基于波动方程迭代反演进行平缆鬼波压制^[9],并将 τ - P 域鬼波压制方法应用于海上实际地震数据的鬼波压制,拓宽地震数据的有效频带^[10]。

然而,海上油气勘探开发不仅需要宽频高分辨率地震资料,还需要高精度地震资料,为此,海上平缆三维资料的宽频高精度处理应运而生,并在油气田勘探开发生产中逐步应用并开始发挥重要的作用,但目前尚缺少专门针对平缆宽频高精度处理技术的分析论述。本文以提高东海西湖凹陷西斜坡深层地震反射品质为目标,系统总结了海上平缆三维资料的宽频保幅高精度处理技术,通过平缆鬼波去除、叠前综合多域去噪、浅水区组合去多次波、基于目标体的精细速度建模和偏移成像等关键技术的应用及效果分析,建立了本区平缆宽频高精度处理流程,并应用于西湖凹陷西斜坡实际资料的重处理,获得了更高分辨率的宽频保幅高精度地震数据体。利用该资料进行地震叠前反演、开展深层储

收稿日期: 2023-02-28

资助项目: 国家科技重大专项“东海深层低渗-致密天然气勘探开发技术”(2016ZX05027); 中海石油(中国)有限公司“七年行动计划”重大科技专项(CNOOC-KJ 135 ZDXM 39)

第一作者: 高顺莉(1976—),女,博士,高级工程师,主要从事海上油气勘探方面的研究工作。E-mail: gaoshl@cnooc.com.cn

层识别和岩性圈闭描述,部署了多口探井和勘探开发结合井,钻探成功率大大提高,验证了平缆宽频高精度三维地震处理关键技术的应用效果,证实其在深层岩性勘探中具有重要作用。

1 西湖西斜坡地震地质特征

1.1 构造沉积特征

西湖凹陷位于东海陆架盆地的东侧,宽缓大陆架的缓坡地带,水深 70~110 m,海流比较稳定,潮水变化较为规律;西湖凹陷面积约 5.9 万 km²,南北长 440 km,东西宽约 110 km,呈 NE 向展布,平面上自西向东可划分为西部斜坡带、中央反转构造带、东部断阶带等次一级构造单元。新生代以来西湖凹陷经历了裂陷-断陷(古新世—早中始新世)、拗陷(晚始新世—渐新世)、反转(中新世)和区域沉降(上新世—第四纪)等多期次构造运动,构造演化复杂,发育多个不整合面,最大沉积厚度超过一万余米。西部斜坡带是最有利的油气勘探区带之一,主要勘探目的层系为始新统平湖组,埋深普遍超过 4 000 m,主要发育浅水三角洲-潮坪沉积体系,(水下)分流河道、潮汐水道、砂坝沉积的叠置性砂体是其主要储层类型。

1.2 地震资料特征

西部斜坡带水深 70~90 m,水底较为平坦,为砂泥岩互层的软海底。采用拖缆单船六缆双源采集模式采集了平缆三维地震资料,主要采集参数:枪缆沉放深度 6 m 和 7 m,震源激发能量 4 110 CI,缆长 4 950 m,道间距 12.5 m,缆间距 100 m,炮间距 25 m,记录长度 7 168 ms。本区的资料成像品质

较差,地震波组特征不明显,信噪比及分辨率都较低,复杂构造区成像差,对深层储层达不到精细刻画和描述的目的。地震资料特征具体表现在以下几个方面。

(1) 海上拖缆限波作用造成资料频带较窄

鬼波是海洋地震勘探中一种特有的地震现象,当地震震源从自由表面以下激发时,在同一个地震界面将会接收到 4 种地震反射,即一次反射波、炮点鬼波、检波点鬼波及炮点检波点鬼波(图 1)。鬼波能量会压制真实的地震响应,降低地震分辨率,减弱地震资料对地层的分辨能力。在实际海上地震采集中,鬼波的陷波点随着水深、震源及电缆沉放深度的变化而变化。在 80 m 水深,6 m 和 7 m 枪缆沉放深度情况下,产生的枪缆叠加的鬼波陷波点在 100~140 Hz 附近,这种鬼波陷波作用在海上采集的原始资料频谱上可明显看到(图 1b)。

(2) 多次波非常发育

图 2 显示了原始记录及速度谱图,从图 2a 显示的炮集记录上可以看到,多次波发育明显,其类型包括海水层鸣震、微屈多次波、层间多次波等,特别是层间多次波异常发育。在图 2b 显示的 2 个速度谱上看出,存在一系列与层间多次波对应的具有低速特征的能量团。多次波掩盖和改造了一次反射波,部分与一次波时差相近,难以去除,剩余多次波的影响造成深层目的层频带降低及成像效果差。

(3) 埋藏深度大及砂泥煤互层引起的成像不佳

由于目的层埋藏深度大而造成能量衰减严重,深层高频成分缺失;同时,砂泥互层在深层速度及阻抗相近,夹杂低速薄煤层进一步复杂化了地震反射界面,使之不易反映出地下真正的构造和储层界面的信息。

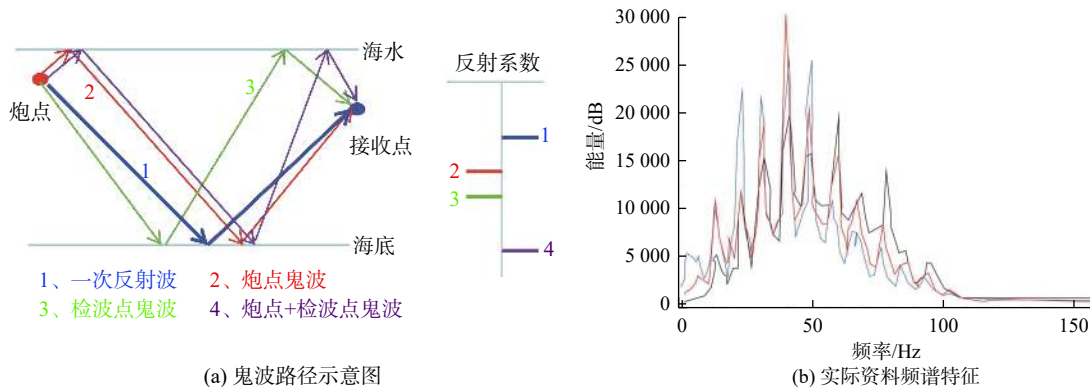


图 1 鬼波路径示意图及实际资料频谱特征

Fig.1 Schematic diagram of ghost wave path and spectrum characteristics of actual data

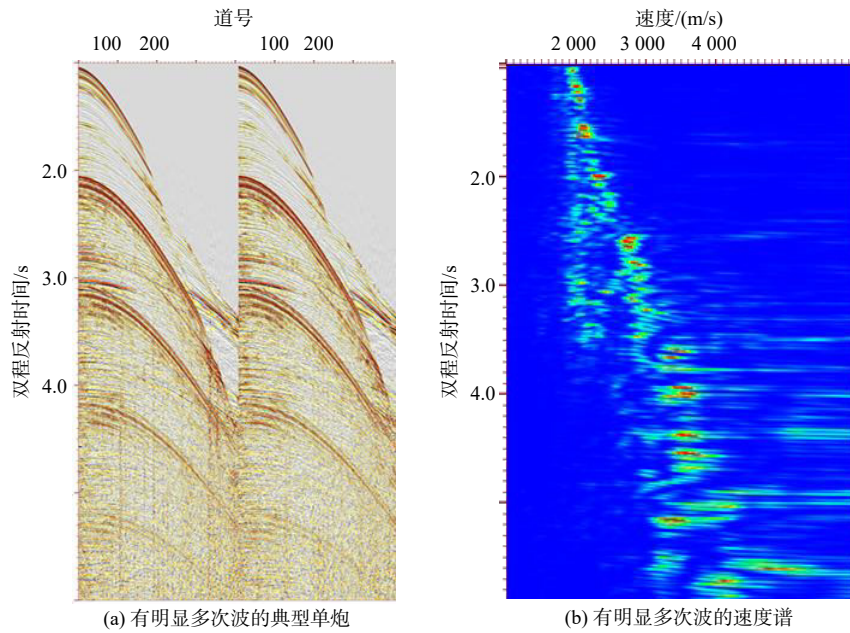


图 2 原始记录及速度谱

Fig.2 Original record and velocity spectrum

2 平缆宽频高精度处理关键技术

宽频处理技术是近年地震处理技术的重要研究方向,对深层成像及复杂构造成像效果明显^[11-12]。陆地宽频高精度地震处理发展比较快,主要包括基于宽频采集数据的处理、基于噪音衰减的高频拓展和基于震源信号的低频补偿等技术。而海上地震资料特征与陆地明显不同,通过海上地震资料特征分析,结合实际资料处理试验,建立了如图 3 所示的平缆宽频高精度地震处理技术流程,其关键技术包括针对鬼波引起深层地震资料有效频带变窄问题的平缆鬼波压制技术,针对复杂超非平稳噪声问题的叠前综合多域去噪技术,针对复杂类型多次波

干扰问题的基于地质模型的组合多次波压制技术,针对工区深层黏滞介质引起的能量衰减问题的深层振幅补偿技术^[13],以及面向深层构造复杂及岩性横向变化大的目标层井控偏移速度分析及精细偏移成像技术。

2.1 叠前综合多域去噪技术

西湖凹陷西斜坡区地震采集炮集记录上存在涌浪、异常振幅、有源干扰、侧面反射、高频干扰等不同类型的噪声,针对噪音类型及其干扰波的特征和出现规律,采取“多域分析、先强后弱、多域压制、多次迭代”的叠前干扰波压制思想,通过精细的方法及参数试验,以多方法串联应用及多域迭代的处理策略,实现对干扰波的有效压制。本文采用的多方法主要包括高通滤波、分频投影滤波、异常振幅压制、分频去噪、自适应高频噪声衰减、高保真 Radon 变换去线性、FK 域反假频大船干扰压制以及 FK 域反假频侧反射压制技术等,最终实现对干扰波的有效压制。

在干扰波压制过程中开展实时质量监控,对干扰压制前后单炮、叠加、噪音剖面进行常规质控外,同时还开展频谱分析及频率扫描分析,确保在噪音去除过程中不损失有效信号的低频及高频有效成分,以达到保幅及高分辨率的处理需求。为了避免干扰压制过程中造成对低频有效反射信号的损害,处理中尤其加强不同技术方法及关键

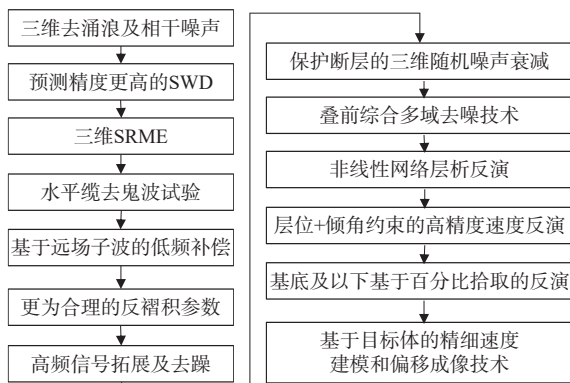


图 3 平缆宽频高精度地震处理流程

Fig.3 Processing flow of horizontal cable broadband high-precision seismology

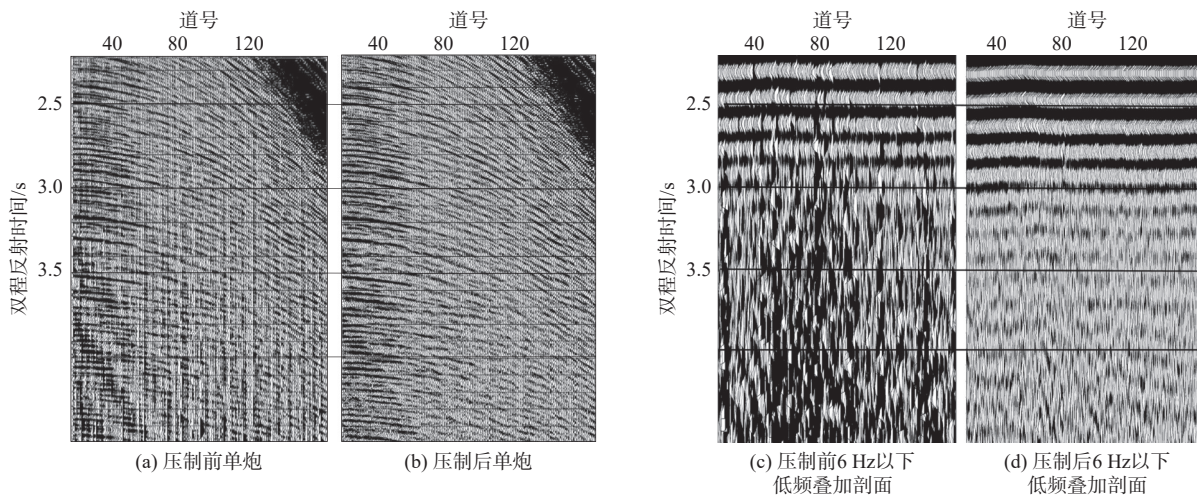


图4 涌浪噪音压制前后的单炮及叠加剖面对比

Fig.4 Comparison of single shot and stack profile before and after suppression of swell noise

参数运用下低频端反射信号的变化监控。图4为涌浪噪音压制前后的单炮对比以及6 Hz以下低频端叠加剖面对比,可以看到,涌浪干扰得到有效压制,特别从6 Hz以下低频端叠加剖面内仍然可以看到较好的有效反射能量信号特征,说明采用的处理参数比较合适,压制干扰的同时有效保持低频端反射信号。

2.2 浅水区多次波组合压制技术

西湖凹陷西斜坡多次波类型复杂,由于反射层系多,层间及微屈多次波难以有效识别和去除,并且多次波特征与有效信号差异小、混叠严重,直接影响目的层成像。为此本文针对复杂的浅水多次波特点,通过多种多次波去除技术的应用试验和对比,形成了针对浅水多次波的有效压制流程,如图5a所示。其中,3DSRME技术^[14]是基于波动方程外推技术的表层多次波建模方法,通过原始数据自身进行褶积得到多次波模型,应用自适应相减去除多次波,该技术可以较好地预测海水面与崎岖海底之间的多次波;水体模型驱动的浅水去多次技术(MWD)^[15]是基于精确的水体模型构建格林函数,用来预测水体多次波;SWD是利用数据反演水体一次反射,形成多道预测算子来预测浅水多次波,能够减小浅层数据质量的影响而获得相对准确的多次波模型。图5b、c为多次波压制前后的深层叠加局部放大效果,图5d、e为压制前后的自相关对比,图5f为压制前后的频谱对比,可以看出,多次波去除后深层微弱的地层反射信号及绕射波信息得到清晰的成像,对改善深层特别是目标区成像有明

显的作用。

2.3 平缆鬼波压制技术

鬼波压制技术是近年地震处理发展的最主要技术之一,主要得益于海上变深度缆采集技术发展的需要。由于这些技术仅适用于变深度缆采集条件,而变深度采集成本相对较高,尤其对工区重新进行采集,成本会更高。为此,本文针对常规三维平缆采集的数据,发展了波动方程延拓迭代减法去除鬼波技术。首先通过子波处理技术消除鬼波及气泡震荡的影响,突出深层有效反射;然后,应用研发的波动方程延拓迭代减法去除鬼波技术,实现改善波组特征,拓宽地震频带,提高地震资料分辨率。

基于海水中位置 (x, y, z) 与海水面之间的上行波和下行波的相互关系可知,该位置处的总波场为该位置处的上行波和下行波场之和,即

$$W(x, y, z, t) = U(x, y, z, t) + D(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中: $W(x, y, z, t)$ 为切除了直达波后的某炮记录;

$U(x, y, z, t)$ 和 $D(x, y, z, t)$ 分别为上行波和下行波。

为了计算接收缆位置 (x_r, y_r, z_r) 处所有时刻 $t > 0$ 的上行波 $U(x_r, y_r, z_r, t)$ 和下行波 $D(x_r, y_r, z_r, t)$,根据鬼波产生的机理可知,在时刻 $t < 2d/V$ 时,有 $U(x_r, y_r, z_r, t) = W(x_r, y_r, z_r, t)$, d 为深度, V 为地震波在海中传播的速度。

假定海水面反射系数为-1,则震源在海水面上且时间为 t 时的下行波与上行波有如下关系,即

$$U(x_s, y_s, z_s, t) = -D(x_s, y_s, z_s, t) \quad (2)$$

基于波场延拓原理,可知在当前 t 时刻的上行

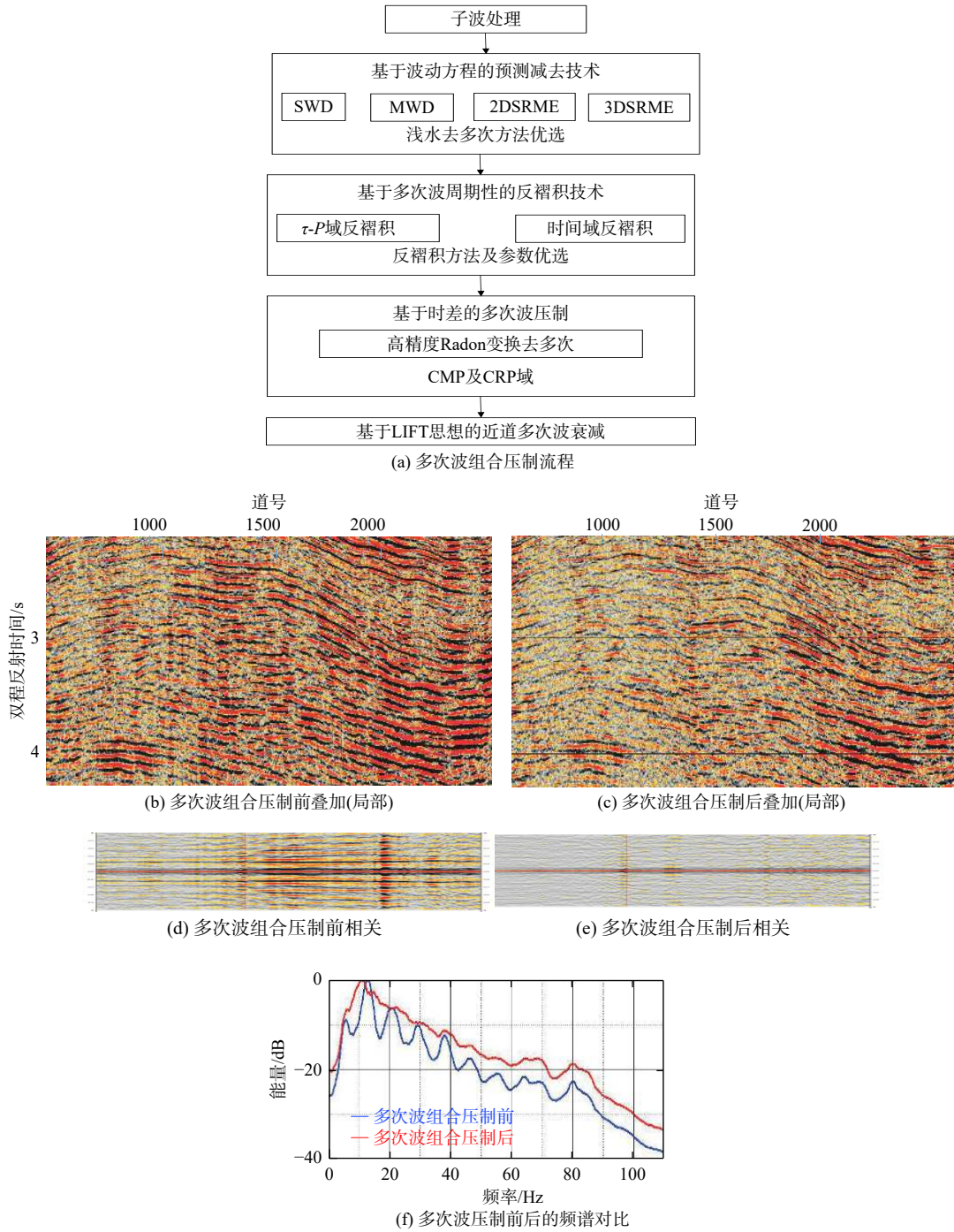


图 5 多次波流程、压制前后的叠加、自相关及频谱对比

Fig.5 Multiple flow, superposition before and after suppression, autocorrelation and spectrum comparison

波 $U(x, y, z, t)$ 和下行波 $D(x, y, z, t)$ 已知时, 可以得到下一时刻的上行波 $U(x, y, z, t + \Delta t)$ 和下行波 $D(x, y, z, t + \Delta t)$, 即

$$\begin{cases} U(x, y, z, t + \Delta t) = P^+(\Delta t)U(x, y, z, t) & z_s \leq z \leq z_r \\ D(x, y, z, t + \Delta t) = P^-(\Delta t)D(x, y, z, t) & z_s \leq z \leq z_r \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P^+(\Delta t)$ 和 $P^-(\Delta t)$ 分别为上行波和下行波延拓算子。从而有

$$\begin{cases} U(x_r, y_r, z_r, t + \Delta t) = W(x_r, y_r, z_r, t + \Delta t) - D(x_r, y_r, z_r, t + \Delta t) \\ D(x_s, y_s, z_s, t + \Delta t) = -U(x_s, y_s, z_s, t + \Delta t) \end{cases} \quad (4)$$

通过反复迭代计算式(3)和式(4), 可以得到接收缆处的上行波, 即压制鬼波后的波场。

图 6 为经波动方程延拓迭代减法鬼波去除的效果, 在放大后的单炮记录上(图 6a), 鬼波压制前存在明显的鬼波效应, 应用该方法后鬼波得到明显

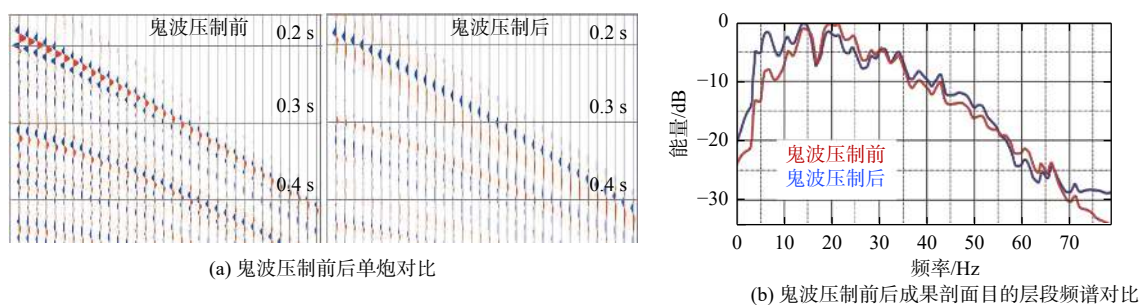


图6 鬼波去除效果及频谱对比

Fig.6 Ghost wave attenuation effect and spectrum comparison

的衰减。在叠加剖面的目的层段(3~4 s)提取频谱(图6b),消除了陷波频率的影响,有效恢复了低频信息。

2.4 基于目标体的精细速度建模和偏移成像技术

西湖凹陷西斜坡平湖组主要目的层断层复杂、小断块发育,平湖组以下地层构造复杂、断裂发育,基底形态及岩性特征差异大,目的层的准确成像对速度模型精度要求较高,同时,由于深层信噪比低、速度模型纵横向变化大,获得精确的速度模型难度较大。

为此,本文基于井震分析充分了解目的层复杂构造变化及岩性变化特征,采用3个步骤实现目标体的精细速度建模。①通过水体速度扫描确定出水体准确速度(1 530 m/s),并基于已有时间偏移数据及地质层位,建立层位约束的各层初始速度模型;②层位速度模型的迭代修正,通过层位控制及地层倾角约束开展非线性网格层析反演和多轮网格层析迭代,结合已有井速度进行空间趋势的交叉验证,得到道集拉平、速度模型和地震剖面构造层位吻合性较好的速度模型;③针对目标体开展网格层析及层速度百分比扫描,更新目标体地层速度。局部基底面及基底以下构造复杂,成像效果差,信噪比较低,速度误差较大,因此,针对基底及以下地层开展层速度百分比扫描,通过速度的扫描和以成像效果为依据的速度百分比拾取,能够进一步提高深层速度模型精度。在速度精细建模的前提下,采用逆时深度偏移成像方法实现工区三维叠前深度偏移。

常规速度建模和基于目标体精细速度建模进行的速度模型剖面对比(图7a、b)及偏移成像剖面对比(图7c、d),明显可以看出,采用精细速度建模得到的速度模型剖面细节上更加清晰,与地下地质体特征更加吻合;偏移成果剖面上也可看出,不仅陡倾角断层获得改善,速度变化平缓的区域,小断

层成像更加清晰,基底反射特征得到提高。

3 斜坡带岩性油气藏地质应用

西部斜坡带主要目的层始新统平湖组,是西湖凹陷最有利的油气勘探区带之一,具有埋藏深、储层薄、砂泥煤交互式发育等特点,不利于储层预测^[16]。通过对西湖凹陷西斜坡实际资料的宽频高精度重处理,获得了更高分辨率的宽频保幅高精度资料成果。深部主要目的层段平湖组的有效频带宽度较老成果有一定的拓展,频谱上提高了低频能量,高频端亦取得一定拓宽。在提高分辨率的同时,注重信噪比和保幅性,波组特征和成像效果均显著提高。

在获得宽频高精度三维地震数据体后,采用约束稀疏脉冲波阻抗反演方法进行了储层预测。由于有效去除了鬼波、多次波和噪音的影响,同时采用了更加精确的速度,反演道集资料品质大大提高,储层反演成果与老资料相比有较大提升,信噪比更高,砂体侧向尖灭更加清晰。

图8显示了过2口井的反演剖面,通过与实钻情况对比,在4 000 m以下深度,合成地震记录吻合率从65%提高到75%;深层储层砂体横向延伸清楚,与钻井吻合性好,15 m以上砂岩反演预测成功率达80%以上。其中,1井主要目的层9套砂体,反演预测出8套;2井主要目的层10套砂体,反演预测出8套。其中,对4 600 m深度主力气层展布范围进行追踪解释,落实了该构造发育鼻状背景下的构造-岩性复合油气藏,高部位断背斜面积0.54 km²,但由于砂体横向变化,断背斜背景下的有利砂体发育范围为0.38 km²。根据储层预测和砂体精细描述结果进行储量计算,所计算储量和气田开发动储量相吻合。

通过平缆宽频高精度三维地震处理关键技术

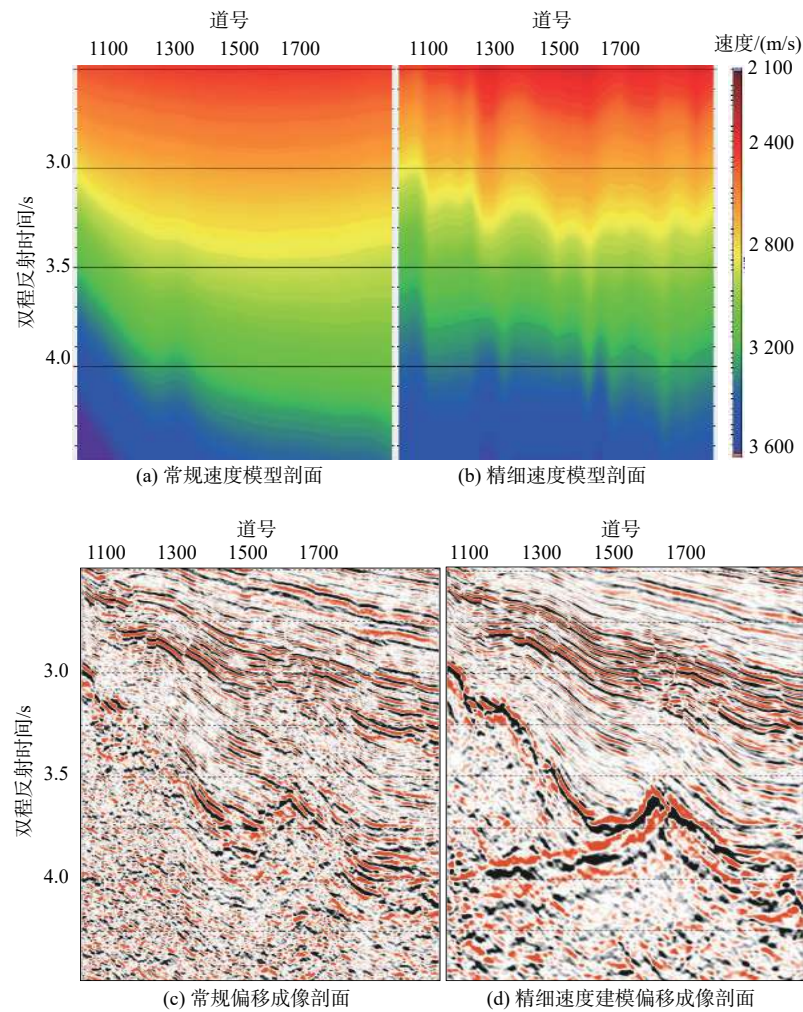


图 7 采用常规速度建模和基于目标体精细速度建模进行偏移的成像剖面对比

Fig.7 Comparison of migration sections using conventional velocity modeling and fine velocity modeling

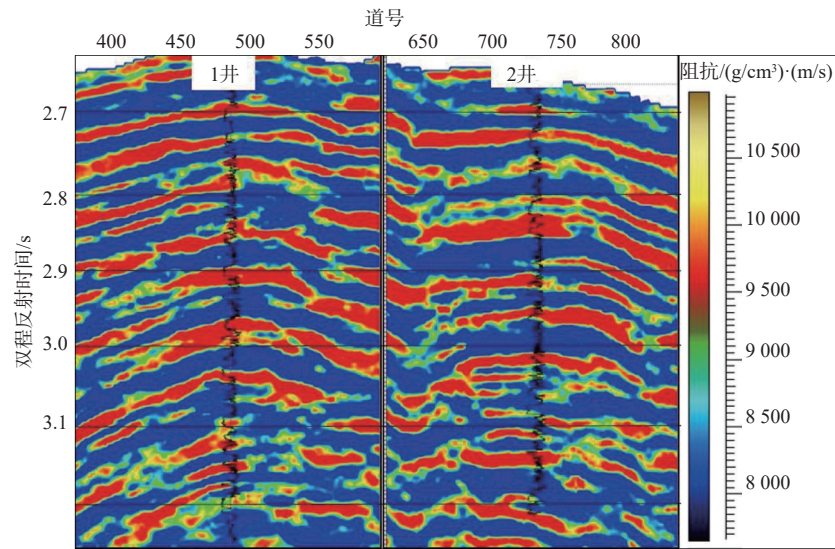


图 8 基于宽频高精度处理的反演预测成果

Fig.8 Inversion prediction results based on broadband and high-precision processing

的应用,有效实现了对西湖凹陷西部斜坡带深层岩性油气藏的细致刻画与描述。基于该处理成果,在平北斜坡带部署了多口探井和勘探开发结合井,钻探成功率大大提高,有效地实现了斜坡带现有油气

田的增储扩边,并新发现一个深层优质岩性气田。通过西湖凹陷斜坡带平湖组岩性油气藏勘探开发实践证实,平缆宽频高精度处理可为岩性油气藏勘探开发提供坚实的资料基础,是海上拖缆三维地震处理的方向。

4 结论及建议

(1)基于海上平缆鬼波压制、叠前综合多域去噪、浅水区组合去多次波和基于目标体的精细速度建模和偏移成像等关键技术的应用,可以达到平缆宽频高精度三维地震处理的目的。

(2)应用海上平缆宽频高精度三维地震处理技术流程及关键技术对西湖凹陷西斜坡地震资料重新处理,获得了更高分辨率的宽频保幅高精度地震数据体,通过地震叠前反演进行砂岩储层识别,取得了良好效果。

(3)海上平缆鬼波压制技术直接影响到海上平缆宽频处理的效果,建议进一步研究和实现电缆浅沉放情况下的鬼波压制方法。

参考文献:

- [1] BARR F J, SANDERS J I. Attenuation of water-column reverberations using pressure and velocity detectors in a water-bottom cable[C]. Expanded Abstracts of the 59th Annual SEG Meeting, 1989: 653-656
- [2] HILL D, COMBED L, BACON J. Over/Under acquisition and data processing the next quantum leap in seismic technology[J]. Geophysics, 2006, 5(2): 81-95.
- [3] SOUBARAS R, DOWLE R. Variable-depth streamer, a broadband marine solution[J]. First Break, 2010, 28: 89-96.
- [4] WANG P, RAY S, PENG C. Premigration deghosting for marine streamer data using a bootstrap approach [C]. Expanded Abstracts of the Annual International Meeting of SEG, 2012: 1-5.
- [5] 陈华,高顺莉,姚刚,等.海上中深层宽频宽方位地震勘探技术及应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2022: 56-74
- [6] 颜中辉,王小杰,刘媛媛,等.东海多次波压制的关键技术[J].海洋地质前沿,2020,36(7): 64-72.
- [7] 谢玉洪,李列,袁全社,等.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): 431-435.
- [8] 高顺莉,陈华,刘建斌,等.中国东海海域中深层地震采集技术攻关进展和实践[J].中国石油勘探,2020,25(1): 691-700.
- [9] 王艳冬,王建华,王小六,等.一种基于波动方程迭代反演的平缆鬼波压制新方法[J].中国海上油气,2018,30(1): 74-80.
- [10] 顾元,文鹏飞,张宝金,等.水平缆地震数据的鬼波压制方法及其应用[J].地球物理学进展,2017,32(4): 1764-1772.
- [11] 毛云新,刘晓晖,包全,等.斜缆宽频宽方位地震资料处理关键技术在西湖凹陷P气田的应用[J].海洋地质前沿,2022,38(3): 74-81.
- [12] 王冲,顾汉明,许自强,等.频率慢度域自适应迭代反演算法压制海上倾斜缆鬼波方法及其应用[J].地球物理学报,2016,59(12): 4677-4689.
- [13] 高顺莉,胡森清,鲁法伟,等. Walkaway 和 Walkaround VSP 技术在东海深层气田中的应用[J].地球物理学进展,2019,34(5): 2016-2021.
- [14] 丁在宇,杨勇,王一鸣,等.浅海拖缆地震数据处理中关键技术的应用与效果[J].石油地球物理勘探,2017,52(S2): 56-63.
- [15] 彭海龙,任婷,赫建伟,等.基于水层建模理论的浅水多次波压制方法研究与应用[J].地球物理学进展,2016,31(4): 1646-1654.
- [16] 周心怀,高顺莉,高伟中,等.东海陆架盆地西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡型岩性油气藏形成与分布预测[J].中国石油勘探,2019,24(2): 153-164.

Broadband and high-precision seismic processing technology and its application on offshore deep lithology exploration

GAO Shunli

(Shanghai Branch of CNOOC (China) Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: Broadband and high-precision processing of offshore horizontal cable 3D data is receiving increasing attention in the exploration of lithological oil and gas reservoirs recently. However, specialized analysis and discussion are lacking. The broadband high-precision processing technology of 3D data of offshore horizontal cables was systematically summarized, and the procedures of broadband high-precision processing and key technologies of horizontal cables in shallow water area were established, including mainly the deghosting in horizontal cables, pre-stack integrated multi-domain denoising, shallow-water multi-wave combinational suppression, and target-based fine-velocity modeling and fine-migration imaging, etc. By applying real data on the western slope of Xihu Sag, the broadband, amplitude-preserving and high-precision seismic results with improved resolution were obtained. The reservoir inversion and geological evaluation carried out by the results are in good agreement with new drillings, from which the geological viewpoint obtained is more reasonable.

Key words: broadband and high-precision; seismic processing; de-ghosting of horizontal cables; shallow water multi-wave combinational suppression; deep lithology exploration