物 探 与 化 探

GEOPHYSICAL & GEOCHEMICAL EXPLORATION

Vol. 47, No. 6 Dec. , 2023

doi: 10.11720/wtyht.2023.0006

张敏,邓盾,李三福,等. 东方 1-1 构造底辟模糊区 OBN 资料关键处理技术及应用[J]. 物探与化探,2023,47(6):1456-1466. http://doi. org/10. 11720/wtyht. 2023.0006

Zhang M, Deng D, Li S F, et al. Critical processing techniques for ocean bottom node data of the diapir fuzzy zone of the Dongfang 1-1 structure and their application [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6):1456-1466. http://doi.org/10.11720/wtyht. 2023.0006

东方 1-1 构造底辟模糊区 OBN 资料关键处理技术及应用

张敏1,邓盾2,李三福1,史文英1,张兴岩1,支珍1

(1. 中海油田服务股份有限公司 物探事业部物探研究院,广东 湛江 524075; 2. 中海石油(中国) 有限公司海南分公司,海南海口 570100)

摘要:东方1-1构造位于南海北部大陆架莺歌海盆地中央泥底辟构造带的北部。该区发现的东方1-1气田是莺歌海盆地发现的第一个整装浅层大气田。该区油气储量资源丰富,然而底辟模糊区成像一直是制约该区油气勘探的主要因素。原有的拖缆地震资料经过多轮次、多公司的重处理,依旧无法有效解决底辟模糊区成像问题。因此在该区进行二次三维OBN 地震资料采集,针对该区地质条件以及OBN 资料特点,本文提出OBN 预处理、多分量联合横波噪声压制、小波域双检合并以及全波形反演(full waveform inversion,FWI)、高精度速度反演等多项关键处理技术,对改善浅层断裂结构及中深层底辟模糊区成像卓有成效,为后续目标评价工作提供可靠的基础资料。

关键词:东方 1-1 构造;底辟模糊区;OBN 地震资料;双检合并;FWI 高精度速度建模

中图分类号: P631.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2023)06-1456-11

0 引言

东方1-1构造位于莺歌海盆地的中北部,是由 深部泥岩在高温高压下塑性流动上拱, 使上覆地层 局部隆起变形而形成的大型背斜构造[1]。1991年 在该区发现 DF1-1 大型整装气田, 因独特的天然气 成藏地质条件而备受瞩目,共钻探井和开发井百余 口[2]。该气田从上往下可分为4个气组: Ⅰ、Ⅱ上、 Ⅱ下、Ⅲ上气组,井间天然气组分(烃气、CO,和 N,) 差异很大且储层横向非均质性强[3-6]。该区块早已 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,即使经过多轮次、多公司重 处理仍然存在目的层段砂体接触关系难以确定、底 辟模糊区成像差等问题,难以满足勘探需要,二次三 维地震勘探迫在眉睫。近年来海上地震资料采集越 来越重视"两宽一高"采集,勘探实例证实,"两宽一 高"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。海底电

缆(ocean bottom cable,OBC)及海底节点(ocean bottom nodes,OBN)是实现海洋"两宽一高"采集的主要方式,OBN 相对于OBC 采集其最大的优点在于施工灵活。由于该区存在多个油气生产平台,为了很好躲避障碍,二次三维地震勘探采用OBN 采集方式。为最大程度上改善中深层底辟模糊区照明,二次三维地震资料采集方向与底辟模糊区断裂走向垂直,也垂直于原有三维地震资料采集方向。

OBN 资料由于其采集方式及采集仪器差异,导致其处理手段与常规拖缆资料大不相同。随着OBN 勘探的大力推广,国内外在 OBN 资料处理上都有很大进步^[7]。Podriguez-Suarez C 等^[8]和 Paffeniiolz 等^[9]对横波噪声来源进行了大量的数值模拟研究,周家雄等^[10]、史文英等^[11]和范宝仓等^[12]研究了曲波域和小波域的横波噪声压制技术。Yang等^[13]、Hugonnet 等^[14]、Richard 等^[15]、朱金强等^[16]和周滨等^[17]利用不同算法提高水陆检匹配算子精度,获得较好的双检合并效果。苗永康^[18]、国运东^[19]、王庆等^[20]、周斯琛等^[21]和李黎等^[22]对 FWI速度建模技术进行研究并分析实际数据应用效果。

收稿日期: 2023-03-03; 修回日期: 2023-09-08

基金项目: 中国海洋石油集团有限公司科技项目(CCL2020HNF0043B01)

第一作者: 张敏(1992-),男,汉族,工程师,主要从事海洋地震资料处理工作。Email:598518663@qq.com

文中针对东方 1-1 构造地质条件以及 OBN 地震资料品质特征,采用 OBN 预处理、多分量联合横波噪声压制、小波域双检合并以及 FWI 高精度速度反演等多项关键处理技术,消除了采集带来的同相轴错动,大幅提升 OBN 资料信噪比、分辨率以及速度建模精度,有效恢复真实构造形态,解决了底辟模糊区成像难题,为该区地质目标评价提供高品质的地震资料。

1 OBN 资料重难点分析

东方 1-1 构造 OBN 资料采用四分量检波器采集。其中 P 分量为压力检波器,该检波器与拖缆检

波器是一致的; z 分量采用速度检波器; x、y 分量是两个相互正交的水平检波器,接收横波信号用于转换波处理。为实现高密度、宽方位地震勘探,采用了正交观测系统,在海底布设8条接收缆后,通过一艘震源船激发了8条炮线,通过滚动搬家获得具有"少道多炮"特征的典型海底采集数据。详细观测参数见表1。

从采集参数表中可以看出,本次采集主要有大震源、长排列、高覆盖以及富低频等特点,在中深层地层穿透以及波场照明方面都有较大的优势,对恢复真实构造形态、刻画砂体接触关系以及改善底辟模糊区成像非常有利。

表 1 东方 1-1 构造二次三维 OBN 采集参数

Table 1 Secondary 3D OBN acquisition parameters of Dongfang 1-1 structure

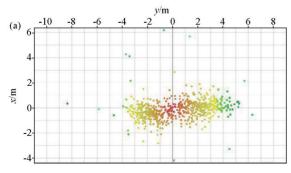
震源参数	参数值	接收参数	参数值	属性参数	参数值
震源个数	2	接收点距/m	50	采集方向	东西
炮间距/m	50	接收线距/m	200	覆盖次数/次	800
炮点深度/m	7	节点深度/m	60~75	采集模式	Swath
炮线距/m	50	电缆长度/m	16000		
震源容量/cuin	4090	单排列道数/道	8×322		

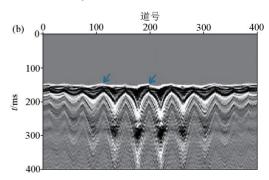
在 OBN 资料采集过程中由于受到海流、潮汐等因素的影响,检波器可能会随着时间而逐渐偏离设计位置^[23-24],这种偏差有时非常严重,对采集资料影响很大。图 1a 为放缆前后声学定位节点位置漂移统计,大部分节点位置移动量 x 方向为±2 m 内,y 方向±4 m 内。在采集物探船上一般会进行二次定位,消除这种误差。通过图 1b 直达波动校正质控来看,在进行野外二次定位后,直达波依旧不能校平,因此在室内处理时会对其进行剩余二次定位。

OBN 资料除了常见的面波、直达波、外源噪声以及线性噪声外,还存在一种特殊的横波噪声。这种噪声是由于海底情况复杂以及检波器耦合较差,检波器与海底存在一定的夹角,使得 z 分量接收到

大量转换波横波信号。图 $2a \sim d$ 给出 z 分量共炮点、共检波点以及十字排列域道集,在共炮点道集上横波噪声呈现强随机信号特征;在共检波点道集上呈低速相干双曲线同相轴特征;而在十字排列域道集上呈三维锥形同相轴特征。常规方法大都采用 F-K 滤波压制,以及利用 $\tau-p$ 变换或小波变换进行噪声识别。这些常规的方法都是利用横波噪声在共检波点道集上的相干性,通过频率、速度以及曲率等特征的差异进行压制。通过图 $2e \sim h$ 可以看出,常规的方法压制后在近道会有很强的噪声残留,甚至会损伤有效信号,因此横波噪声压制是 OBN 资料中重难点。





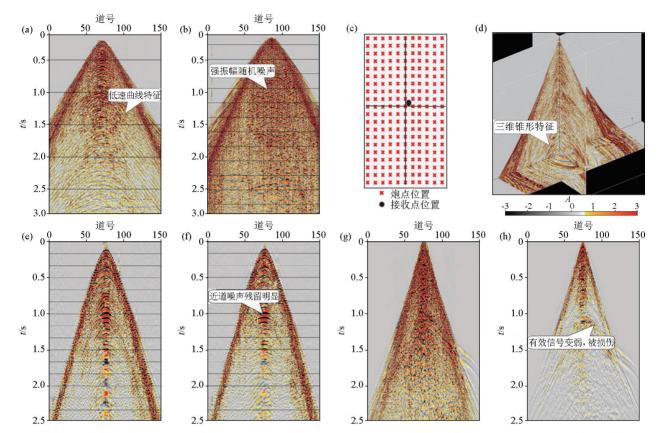


a-放缆前后节点定位位置差统计;b-直达波线性校正后

a-statistical of node positioning position difference before and after cable laying; b-after linear correction of direct wave

图 1 节点二次定位质控

Fig. 1 The Node secondary positioning quality control



-z 分量共检波点道集;b—z 分量共炮点道集;c—十字排列示意;d—十字排列共检波点道集;e—横波噪声压制前共检波点道集;f—横波噪声 压制后共检波点道集:g-横波噪声压制前共炮点道集:h-横波噪声压制后共炮点道集

a—z component common receiver gathers; b—z component common shot gathers; c—the cross-spread arrangement schematic diagram; d—the cross-spread receiver gather; e-common receiver gathers before shear wave noise suppression; f-common receiver gathers after shear wave noise suppression; g-common shot gathers before shear wave noise suppression; h--common shot gathers after shear wave noise suppression

图 2 横波噪声特点分析及常规压制方法效果分析

Fig. 2 Analysis of shear wave noise characteristics and effect of conventional suppression method

十米到上百米的海底,比常规拖缆沉放深很多。这 种采集的优缺点都很明显,其优点在于更加容易采 集到丰富的低频信号,获得更强的地层穿透能力,有 利于特殊地质体刻画;其缺点在于检波器沉放越低, 检波点鬼波陷波频率也越低,这对提高数据分辨率 带来了挑战。该工区水深大概在70 m 左右,最低的 电缆鬼波陷波频率为 11 Hz,严重制约地震资料的 有效频宽,不利于砂体接触关系的刻画。因此做好 双检合并,拓宽数据频带也是 OBN 的处理难点。

速度建模一直是地震资料处理的重中之重。该 区速度结构复杂,存在多套低速异常区域,超浅层小 尺度低速异常、中层的大气田低速异常以及眉山组 高温高压带来的速度反转都给该区速度反演带来了 极大的难度。常规的网格层析难以反演出浅层的小 尺度低速异常,这不利于下覆地层构造形态的恢复。 其次眉山组的高温高压低速异常区刚好处于模糊区 核部,其道集质量较差,利用道集剩余时差进行反演 的常规方法在该区域基本失效,这对底辟模糊区的 成像是致命的。

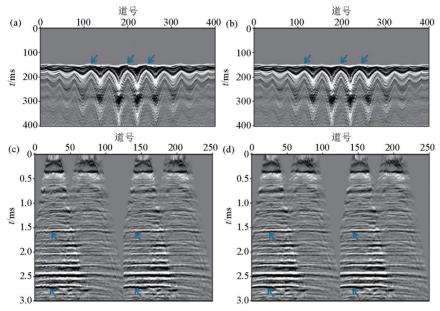
通过上述的 OBN 资料品质分析,总结处理重难 点有剩余二次定位、横波噪声压制、电缆鬼波压制以 及速度建模 4 个方面。文中根据该区 OBN 地震资 料特点,采取针对性处理对策,有效解决该区处理重 难点,提高地震数据的品质以及速度反演精度,最终 获得高质量地震成像剖面。

OBN 关键处理技术

2.1 OBN 预处理技术

通过前面的分析可以看出,OBN 资料存在明显 的时差,针对这种野外采集带来的时差,通常采用 OBN 预处理技术(包括潮汐校正以及剩余二次定 位)。在野外采集时潮汐变化会引起激发点和接收 点的高程变化,进而带来潮汐校正问题。一般采用 潮汐表信息或验潮仪数据进行潮汐静校正。除潮汐 校正外,OBN 资料还存在比较明显的剩余二次定位 问题,常见的方法为直达波定位。该方法主要利用 节点及其周围的炮点,按照距离列出一系列公式,求 取检波点到炮点距离最小和即为检波点二次定位的位置。图 3a 与图 3b 为二次定位主要的质控对比,从图中可以看出,预处理前直达波存在明显的不平现象,预处理后直达波不平的问题得到有效解决。

从图 3c 与图 3d 预处理前后叠加剖面对比可以看出,预处理前由于存在采集原因带来的时差,在叠加剖面上存在垂直断层假象,预处理后这种假象得到很好的消除,有效地增强同相轴连续性。



a—预处理前直达波线性动校正;b—预处理后直达波线性动校正;c—预处理前叠加剖面;d—预处理后叠加剖面

a—linear NMO correction of direct wave before preprocessing; b—linear NMO correction of direct wave after preprocessing; c—stacked section before preprocessing; d—stacked section after preprocessing

图 3 预处理前后效果分析

Fig. 3 Effect analysis before and after pre-processing

2.2 多分量联合横波噪音衰减技术

在四分量检波器采集时,z、x 和 y 三个分量是同步接收到横波信号,由于接收角度不同,导致振幅略有差异,但z 分量的横波信号与 x、y 分量相似性非常高。图 4a~d 为 z 分量与 x、y 分量的左右对比,z 分量与 x、y 分量的横波信号在近、远偏移距都非常相似,本文将 z 分量与 x、y 分量进行联合匹配就能得到 z 分量的横波噪声模型。考虑到横波噪声模型可能存在纵波信号残留,将得到的噪声模型用纵波速度进行动校正,再将校平的纵波信号剔除,这样得到最终的横波噪声模型。从图 4e 和图 4f 可以看出,横波噪声模型主要为低频低速的曲线,与 z 分量的有效信号区分明显,这对噪声分离非常有利。

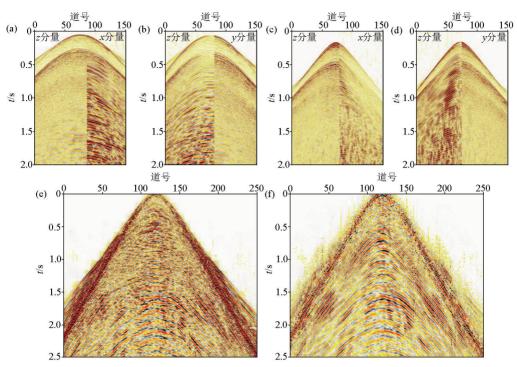
由于横波噪声在近道与有效信号速度差异小,直接采用匹配减的方法效果不好,甚至会损伤有效信号。通过前面的分析知道,横波噪声在十字排列域呈三维锥形特征,与有效波区分度更大。因此本文考虑在三维道集上利用三维曲波变换进行噪声分离。曲波变换不仅具有小波变换的多分辨率特性和时频局域特性,还克服了小波变换表示边缘、轮廓等高维奇异时存在的局限性[25-26]。横波噪声主要集中在 60 Hz 以下,并且不同频带其分布强度也不同,

通常在进行三维曲波域匹配减时,随着频率增加匹 配减压制强度会逐渐降低。

从图 5a~d 采用不同方法横波噪声压制对比可以看出,常规方法压制后地层连续性依旧较差,存在明显横波噪声残留,采用本方法后横波噪声压制更加干净。从图 5e 频谱分析也可以看出,本方法压制后 P 分量与 z 分量频谱陷波互补特征更加明显,从图 5f 的信噪比分析也可看出,本方法压制后信噪比提升更加明显。

2.3 小波域双检合并技术

拖缆资料采用算法驱动的方法进行检波点鬼波压制。但由于地下真实波场远比正演模型复杂,而且随着地层深度增加,地震子波变化也越剧烈,通过算法驱动的方法就难以准确地估算出检波点鬼波。因此采用算法驱动的方法难以将检波点鬼波压制干净。海底地震(ocean bottom seismic,OBS)数据则是利用数据驱动的方法进行检波点鬼波压制,这也是目前认为最有效的电缆鬼波压制手段[27]。如图 6 双检合并基本原理所示,水陆检对上行波和下行波的响应存在差异,通过标定求和即可分离出上下行波,达到压制检波点鬼波的目的。不仅可以很好弥补频谱陷波,拓宽资料频带,还能提高资料信噪比。

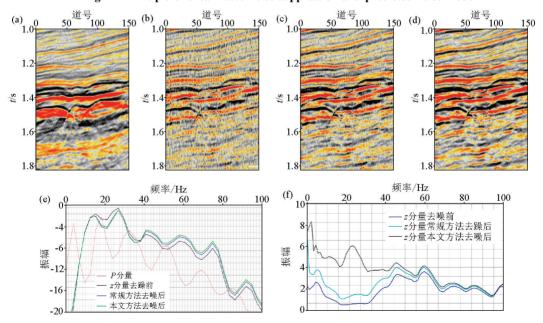


a—远偏移距z分量与x分量左右对比;b—远偏移距x分量与y分量左右对比;c—近偏移距z分量与x分量左右对比;d—近偏移距z分量与y分量左右对比;e—z分量共检波点道集;f—采用本方法预测出的z分量横波噪声模型

a—far offset z component and x component left and right contrast diagram; b—far offset z component and y component left and right contrast diagram; c—near offset z component and x component left and right contrast diagram; e—z component common receiver gathers; f—the z component shear wave noise model predicted by this method

图 4 横波噪声压制原理及预测出的噪声模型

Fig. 4 Principle of shear wave noise suppression and predicted noise mode

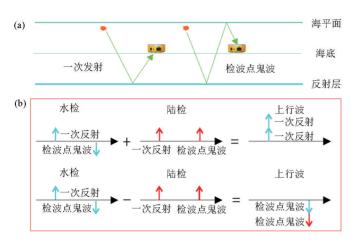


a-P分量叠加剖面;b-z分量横波噪声压制前叠加剖面;c-z分量常规方法横波噪声压制后叠加剖面;d-z分量本文方法横波噪声压制后叠加剖面;e-不同方法去噪前后频谱分析曲线;f-不同方法去噪前后信噪比分析曲线

a—P component stack section; b—the stack section before z component shear wave noise suppression; c—z component conventional method superposition profile after shear wave noise suppression is used in this method; e—spectrum analysis curves before and after denoising with different methods; f—S/N ratio analysis curves before and after denoising by different methods

图 5 横波压制效果分析

Fig. 5 Analysis of transverse wave suppression effect



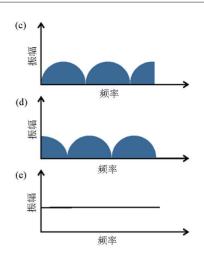


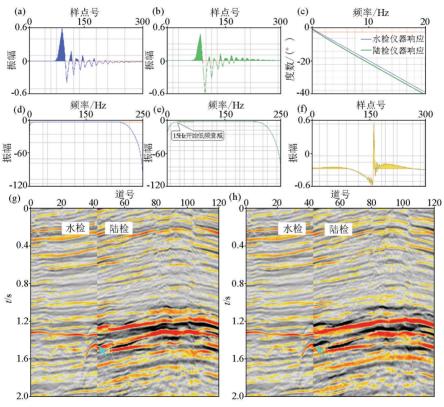
图 6 双检合并示意

Fig. 6 Schematic diagram of double check merging

在进行合并前需要特别注意水陆检仪器响应差异。该工区水检是压力检波器得到地震压力场,陆检是速度检波器得到速度场。由于检波器设计差异,两种检波器的灵敏度和动态范围等都有所不同,导致其在仪器响应上存在明显差异。

图 7a 和图 7b 为水、陆检仪器响应,从波形上看

存在明显差异。从图 7c~e 的相位谱及频谱分析也可以看出两者都存在明显差异。尤其是陆检在低频端出现明显衰减,这种频率差异对匹配是非常不利的。因此需要通过水陆检仪器响应设计匹配算子进行水陆检一致性处理,如图 7f 为设计出的匹配算子,通过该算子对水陆检进行全局相位及频率匹配。



a—水检仪器响应;b—陆检仪器响应;c—水、陆检仪器响应相位谱;d—水检仪器响应频谱;e—陆检仪器响应频谱;f—匹配算子;g—仪器响应校正前水陆检左右对比;h—仪器响应校正后水陆检左右对比

a—hydrophone instrument response; b—geophone instrument response; c—the phase spectrum of hydrophone and geophone instrument response; d—the frequency spectrum of hydrophone instrument response; e—the frequency spectrum of geophone instrument response; f—the matching operator; g—the left and right comparison diagram of hydrophone and geophone before instrument response correction; h—the left and right comparison diagram of hydrophone and geophone after instrument response correction

图 7 水陆检仪器响应效果分析

Fig. 7 Effect analysis of dual-sensor instrument response

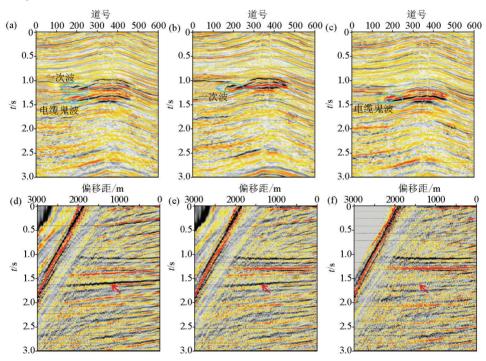
从图 7g 及图 7h 图中蓝色箭头指示处可以看出,经过仪器响应校正后,水陆检的检波点鬼波极性相反的对应关系更好,更有利于双检合并。

常规的双检合并方法主要通过叠加道进行匹 配,难以求取精确的刻度算子。为提高刻度算子精 度,本文提出小波域双检合并技术。小波变换被称 为"数学显微镜",深受工程师重视[28]。相对于传统 F-K域,小波域具备很好的局部化分析能力以及非 平稳信号分析能力,可以有效地解决因海底耦合、海 况以及波场空间传播不同等导致的波场差异。此处 详细的处理过程如下:首先通过水陆检交叉鬼波化 的方法进行一致性处理:将交叉鬼波化后的数据变 换到小波域进行匹配得到标定算子;再应用到经过 小波域变换后的陆检数据上;然后再进行反变换,得 到标定后的陆检信号;最后在时间域将数据相加相 减得到上下行波。由于直达波和折射波比有效性信 号振幅强很多,存在能量上的突变,为保证小波变换 稳定,在进行该步骤时需要尽可能将直达波、折射波 等强能量噪声压制干净。理论上讲,小波域频率划 分得越细匹配精度越高。但是频率划分得越多,数 据统计效应越差,因此一般在实际数据应用中将数 据进行四阶小波变换即可。

图 8a 为双检合并前水检叠加剖面,从画圈处可以看到由于电缆鬼波的存在,地震剖面上存在多套岩层假象。通过双检合并后该现象得到很好的消除,见图 8b,分离后得到的电缆鬼波与有效信号极性相反且存在一定周期差异见图 8c。从图 8d、图 8e及图 8f 红色箭头指示处可以看出,采用交叉鬼波化方法,检波点鬼波得到一定压制但仍存在明显残余,对比本文方法可以明显看出检波点鬼波压制更干净。从图 9 水检频谱分析可以看出检波点鬼波陷波频率为 11、22、33、44 和 55 Hz 等。通过与交叉鬼波化方法对比,本文方法尤其在低频端 40 Hz 以下陷波频率弥补更好,地震数据频带更宽。

2.4 FWI 高精度速度建模技术

FWI 充分利用地震波场中的运动学和动力学信息估计地球内部介质的弹性参数,是一种高精度速度建模的方法和油藏描述的手段^[29]。该区浅层速度复杂,存在多套低速异常区,对速度精度要求较高。本文的建模思路是浅层乐东组以及莺歌海组利用折射波 FWI 进行高精度速度建模,中深层黄流组和眉山组采用网格层析反演更新速度模型。



a—双检合并前 P 分量叠加剖面;b—双检合并后一次波叠加剖面;c—双检合并后检波点鬼波叠加剖面;d—双检合并前 P 分量 cdp 道集;e—交叉鬼波化方法一次波 cdp 道集;f—本文方法一次波 cdp 道集

a—P component stacking profile before dual-sensor summation; b—the primary wave superposition profile after dual-sensor summation; c—the receiver ghost wave stacking profile after dual-sensor summation; d—P component cdp gather before dual-sensor summation; e—the primary wave cdp gathers after cross-ghosting method; f—the primary wave cdp gathers after this method

图 8 小波域双检合并效果分析

Fig. 8 Effect analysis of dual-sensor summation in Wavelet Domain

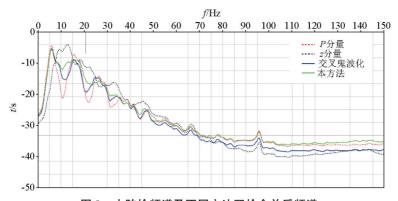
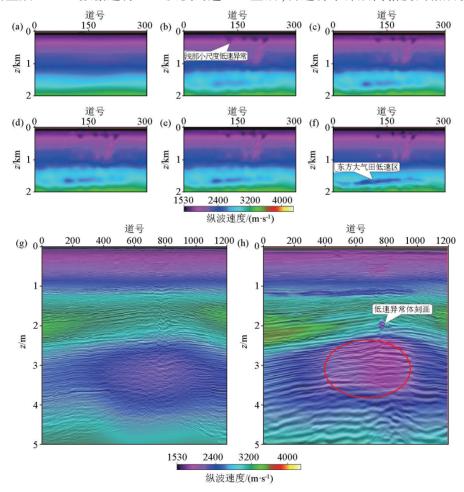


图 9 水陆检频谱及不同方法双检合并后频谱

Fig. 9 The frequency spectrum of dual-sensor and the frequency spectrum of the different dual-sensor summation

为防止 FWI 在速度反演过程中出现周期跳跃,要求初始速度模型的低频背景尽可能准确。本工区直接采用拖缆资料速度为初始速度模型见图 10a。图 10b~f 为主频 4.5~12 Hz 数据 FWI 逐步迭代反演的结果,采用主频 4.5 Hz 数据进行 FWI 反演的速

度,已经刻画出浅部小尺度的低速异常,相对于初始速度其精度得到大幅提升。随着主频不断增加可以看出,无论是浅层还是中层的大气田低速区分辨率在不断提升。通过 FWI 反演获得浅层高精度速度模型后,再进行中深层高精度网格层析反演。图10g、h



a—初始速度模型;b—主频 4.5 Hz 折射波 FWI;c—主频 6 Hz 折射波 FWI;d—主频 8 Hz 折射波 FWI;e—主频 10 Hz 折射波 FWI;f—主频 12 Hz 折射波 FWI;g—初始速度模型;h—最终速度模型

a—initial velocity model;b—the main frequency 4.5 Hz refracted wave FWI;c—the main frequency 6 Hz refracted wave FWI;d—the main frequency 8 Hz refracted wave FWI;e—the main frequency 10 Hz refracted wave FWI;f—the main frequency 12 Hz refracted wave FWI;g—initial velocity model;h—final velocity model

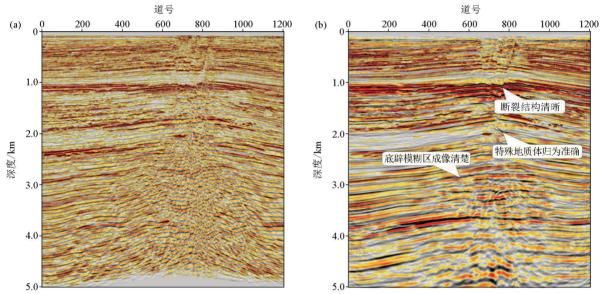
图 10 FWI 速度反演及高精度网格层析反演效果分析

Fig. 10 Effect analysis of FWI velocity inversion and vertical velocity component and high precision grid tomography inversion

给出初始速度模型及最终速度模型,可以看出乐东 组的浅层气低速区以及黄流组异常低速刻画更加清 楚,眉山组高温高压的低速反转区精度更高。采用 这种组合的速度建模方法,有效解决了该区速度反 演难题,获得比较精准的速度模型,为底辟模糊区成 像以及真实构造形态的恢复打下较好的数据基础。

3 实际数据应用效果

东方1-1构造受泥底辟构造带影响,中深层成 像模糊区,砂体接触关系不清楚,存在多套低速反转 区速度结构十分复杂,地层真实形态难以刻画,影响 地质目标评价。针对本次采集的 OBN 地震资料,采 用多项关键处理技术,全面提高偏移前道集质量和 深度域速度精度。图 11a 和图 11b 为新老资料叠前 深度域偏移成像结果,对比中可以看出 OBN 资料在 底辟模糊区成像优势非常明显,地层信噪比及分辨 率更高,地层同相轴更加连续,砂体接触关系清晰, 大幅度改善底辟模糊区成像。从图 12a 和图 12b 新 老资料 1 300 m 方差体切片可以看出, OBN 新资料 断裂结构非常清晰,而且信噪比较高。前人认为模 糊区为泥底辟导致地层破碎,现今通过 OBN 资料分 析认为模糊区为断层控洼模式,底辟模糊区的地质 认识发生巨大的变化,对后续油气圈闭研究非常重 要。

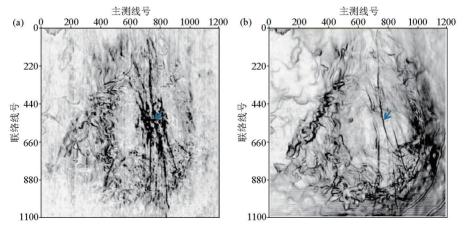


a-拖缆老资料叠前深度偏移成像剖面;b-OBN 新资料叠前深度偏移成像剖面

a-towed cable old data prestack depth migration imaging profile; b-OBN new data prestack depth migration imaging profile

新老资料成像剖面效果分析 图 11

The effect analysis of new and old data imaging profile Fig. 11



a--拖缆老资料 1 300 m 方差体切片:b-OBN 新资料 1 300 m 方差体切片

-towed cable old data 1 300 m variance volume slice; b-OBN new data 1 300 m variance volume slice

图 12 新老资料成像剖面及方差体属性效果分析

Fig. 12 The effect analysis of variance body attribute

4 结论

OBN地震采集可以有效地增加底辟模糊区照 明,获得的 OBN 资料具有长排列、高覆盖以及富低频 等特点,非常有利于底辟模糊区成像。OBN 节点采 集时海底洋流会使海底节点存在漂移,OBN 预处理 技术有效解决了该问题带来的垂直断层假象。多分 量联合横波噪声压制以及小波域双检合并技术都是 将数据变换到不同的域,通过频率、倾角以及空间等 信息将数据进行细分,大幅度提高了数据处理精度, 获得了较好的处理效果。除此之外,针对该区浅部小 尺度的低速异常,以及浅中层的东方大气田低速区, 利用 OBN 资料的长排列信息,通过 FWI 高精度速度 建模技术,有效地提升速度模型的分辨率。最终得到 的三维地震成像剖面效果明显优于传统拖缆三维地 震剖面,大幅度改善了底辟模糊区地震成像效果,满 足油气勘探的需要。该资料的成功应用,对后续莺歌 海底辟模糊区攻关具有非常宝贵的借鉴意义。

参考文献(References):

- [1] 谢培勇. 海上浅层大气田——DF1-1 气田[J]. 天然气工业, 1999,19(1):43-46.
 - Xie P Y. Marine shallow giant gas field; DF1-1 gas field [J] . Natural Gas Industry, 1999, 19(1):43-46.
- [2] 刘爰群,范彩伟,蔡军,等. 高温高压盆地东方区黄流组三维压力建模技术[J]. 物探与化探,2016,40(2):423-428.

 Liu A Q, Fan C W, Cai J, et al. The three-dimensional pressure modeling technology for Huangliu Formation of Dongfang area in the HTHP basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016,40(2):423-428.
- [3] 岳绍飞,张辉,王庆帅,等. 莺歌海盆地东方 A 气田莺歌海组二 段沉积新认识:海底扇浊积席状砂[J]. 海相油气地质, 2017, 22(4):11-18. Yue S F, Zhang H, Wang Q S, et al. Turbidite sand: A new view on
 - sedimentary facies of Pliocene Zhujiang member-2 in DF-A gas field, Yinggehai Basin [J]. Marine Origin Petroleum, 2017, 22 (4):11-18.
- [4] 刘铁树,王俊兰. 莺歌海盆地演化及天然气分布[J]. 中国海上油气地质,1994,8(6):394-400.
 Liu T S, Wang J L. Basin evolution and natural gas distribution in Yinggehai Basin[J]. China offshore Oil and Gas(Geology),1994,8(6):394-400.
- [5] 于俊峰,刘全稳,王立锋,等. 莺歌海盆地东方 13 气田气水分布模式[J]. 海相油气地质,2020,25(2):132-140.
 Yu J F, Liu Q W, Wang L F, et al. Gas-water distribution models of Dongfang 13 gas field Yinggehai Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology,2020,25(2):132-140.
- [6] 熊小峰,徐新德,甘军,等. 莺歌海盆地中央底辟带天然气差异

- 分布与运聚成藏特征莺歌海盆地东方 13 气田气水分布模式 [J]. 海洋地质前沿,2017,33(7);24-31.
- Xiong X F, Xu X D, Gan J, et al. Differentiated gas distribution, migration and accumulation in the central diapir belt of the Yinggehai basin [J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(7):24-31.
- [7] 李斌,冯奇坤, 张异彪,等. 海上 OBC-OBN 技术发展与关键问题[J]. 物探与化探,2019,43(6):1277-1284.

 Li B, Feng Q K, Zhang Y B, et al. Summary of development and key issues of offshore OBC-OBN technology[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2019,43(6):1277-1284.
- [8] Rodriguez-Suarez C, Stewart R R, Margravé G F. Where does S-wave energy on OBC recordings come from? [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2000, Society of Exploration Geophysicists, 2000;1170-1173.
- [9] Paffenholz J, Shurtleff R, Hays D, et al. Shear wave noise on OBS V_z data part I evidence from field data [C]//Vienna; 68th EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2006, European Association of Geoscientists & Engineers, 2006; 625 – 630.
- [10] 周家雄, 马光克, 隋波, 等. 基于 Curvelet 域多分量阈值控制的 OBC 垂直分量横波噪声压制方法[J]. 中国海上油气, 2020, 32 (3):51-58.
 - Zhou J X, Ma G K, Sui B, et al. Shear wave noise suppression method on OBC vertical component based on multi-component threshold control in Curvelet domain [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(3):51–58.
- [11] 史文英,方中于,李列,等.海底电缆陆检噪音衰减方法及其在乌石地区的应用[J]. 世界地质,2015,34(2):516-523. Shi W Y, Fang Z Y, Li L, et al. Geophone noise and attenuation of ocean bottom cable and its application in Wushi area[J]. Global Geology,2015,34(2):516-523.
- [12] 范宝仓,陈文贵,王海昆,等. 海底电缆 Z 分量横波噪音特征分析及衰减方法[J]. 中国海上油气,2017,29(3):31-39.

 Fan B C, Chen W G, Wang H K, et al. Characteristic analysis and attenuation of OBC geophone Z component sheear wave noise[J]. China Offshore Oil and Gas,2017,29(3):31-39.
- [13] Yang X M, Wang Y C, et al. A processing workflow for ocean bottom cable dual-sensor acquisition data: A case of 3D seismic data in Bohai Bay[J]. Open Journal of Geology, 2019, 9(1):67-74.
- [14] Hugonnet P, Boelle J L, Herrmann P, et al. PZ Summation of 3D WAZ OBS Receiver Gathers [C]//Vienna;73rd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011, European Association of Geoscientists & Engineers, 2011;23-26.
- [15] Richard B, ea al. Hydrophone-Geophone deghosting of OBC data in the τ-p domain [J]. EAGE 60th Conference & Exhibition Leipzig Germany, 1998, 4(2):208-209.
- [16] 朱金强,张明强,焦叙明,等. 海上宽方位地震资料多次波压制技术研究与应用[J]. 工程地球物理学报,2022,19(3):368-375.

 Zhu J Q,Zhang M Q,Jiao X M, et al. Research and application of multiple suppression techniques for marine wide-azimuth data[J].

 Chinese Journal of Engineering Geophysics,2022,19(3):368-375.
- [17] 周滨,龚旭东,高梦晗,等. 海底电缆交叉鬼波化双检合并技术 改进及应用[J]. 中国海上油气,2015,27(1):49-52,67.

- Zhou B, Gong X D, Gao M H, et al. An improvement of the dual-sensor summation technique for corss-ghosting from OBC and its application [J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(1):49–52,67.
- [18] 苗永康. 叠前地震全波形反演实际应用的关键影响因素[J]. 物探与化探,2016,40(5):947-954.
 - Miao Y K. Key factors affecting the practical application of prestack seismic waveform inversion [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(5):947–954.
- [19] 国运东. 基于组合震源编码的多尺度全波形反演方法[J]. 物 探与化探,2022,46(3);729-736.
 - Guo Y D. Multi-scale full waveform inversion method using combined source encoding [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3):729-736.
- [20] 王庆,张建中,黄忠来. 时间域地震全波形反演方法进展[J]. 地球物理学进展,2015,30(6):2797-2806.

 Wang Q,Zhang J Z, Huang Z L. Progress in the time-domain full waveform inversion [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(6): 2797-2806.
- [21] 周斯琛,李振春,张敏,等. 基于截断牛顿法的频率域全波形反演方法[J]. 物探与化探,2017,41(1):147-152.

 Zhou S C,Li Z C,Zhang M, et al. Full waveform inversion in frequency domain using the truncated Newton method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2017,41(1):147-152.
- [22] 李黎,沈水荣,吴意明,等. 全波形反演与断控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.

 Li L,Shen S R, Wu Y M, et al. Velocity modeling combining full waveform inversion with fault controlled tomographic inversion: A case study of A oilfield in the eastern South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas,2020,32(5):107-113.
- [23] 王忠成,周华伟,童思友,等. 深水海底节点二次定位方法[J]. 石油地球物理勘探,2020,55(2):242-247,227. Wang Z C, Zhou H W, Tong S Y, et al. Secondary positioning of
 - deep ocean bottom nodes [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020,

- 55(2):242-247,227.
- [24] 邓元军,杨志国,张建峰,等. 新的声波二次定位技术在海底电缆地震勘探的应用[J]. 地球物理学进展,2013,28(5):2718-2724.
 - Deng Y J, Yang Z G, Zhang J F, et al. A new acoustic secondary positioning in the OBC seismic prospecting [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(5):2718-2724.
- [25] 胡雨,谢凯,阮宁君,等. 基于三维曲波变换的弱信号恢复方法研究[J]. 计算机工程与应用,2016,52(18):199-202.
 Hu Y, Xie K, Ruan N J, et al. Method of weak signal recovery based on 3D curvelet transform[J]. Computer Engineering and Applications,2016,52(18):199-202.
- [26] 张之涵,孙成禹,姚永强,等. 三维曲波变换在地震资料去噪处理中的应用研究[J]. 石油物探,2014,53(4):421-430.

 Zhang Z H,Sun C Y,Yao Y Q, et al. Research on the application of 3D curvelet transform to seismic data denoising[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2014,53(4):421-430.
- [27] 曹静杰,杨志权,杨勇,等. 一种基于曲波变换的自适应地震随机噪声消除方法[J]. 石油物探,2018,57(1):72-78,121.

 Cao J J, Yang Z Q, Yang Y, et al. An adaptive seismic random noise elimination method based on Curvelet transform [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018,57(1):72-78,121.
- [28] 汪金菊,李青,徐小红,等. 基于分数阶小波域 GSM 模型的地震信号随机噪声压制方法[J]. 地球物理学报,2018,61(7): 2989-2997.
 - Wang J J, Li Q, Xu X H, et al. Random noise attenuation method of seismic signal based on the fractional order wavelet domain GSM model[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(7):2989–2997.
- [29] 张健男,但志伟,孙雷鸣,等.全波形反演技术在深海地震成像中的研究及应用[J].海洋工程装备与技术,2019,6(sl):250-254.
 - Zhang J N, Dan Z W, Sun L M, et al. Research and application of full waveform inversion of the deep sea seismic imaging[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2019, 6(s1);250-254.

Critical processing techniques for ocean bottom node data of the diapir fuzzy zone of the Dongfang 1-1 structure and their application

ZHANG Min¹, DENG Dun¹, LI San-Fu¹, SHI Wen-Ying¹, ZHANG Xing-Yan¹, ZHI Ling¹

(1. Geophysical Research Institute, Geophysical Division, COSL, Zhanjiang 524057, China; 2. Hainan Branch of CNOOC Ltd., Haikou 570100, China)

Abstract: The Dongfang 1-1 structure is situated in the northern part of the central mud diapir tectonic belt of the Yinggehai Basin on the northern continental shelf of the South China Sea. The Dongfang 1-1 gas field is the first uncompartmentalized shallow gas field discovered in the Yinggehai Basin. Despite abundant oil and gas reserves in this region, the imaging of the diapir fuzzy zone has been a critical factor restricting oil and gas exploration in this region. The original streamer-based seismic data, through multiple rounds of multi-company reprocessing, still failed to effectively image the diapir fuzzy zone. Therefore, the second acquisition of three-dimensional ocean bottom node (OBN) seismic data was conducted in this region. According to the geological conditions and the characteristics of OBN data in this region, this study proposed several critical processing techniques, including OBN preprocessing, multi-component joint shear-wave noise suppression, wavelet-domain dual-sensor summation, and full-waveform-inversion (FWI) high-precision velocity modeling. These techniques effectively improved the imaging of shallow fault structures and middle and deep diapir fuzzy zones, thus providing reliable fundamental data for the subsequent target evaluation.

Key words: Dongfang 1-1 structure; diapir fuzzy zone; OBN seismic data; dual-sensor summation; FWI high-precision velocity modeling (本文编辑:叶佩)