doi: 10.11720/wtyht.2026.1011
周凡, 李明, 谭港, 等. 南海西部 W 凹陷 OBC 资料处理关键技术研究与应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(3): 481-488. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1011
Zhou F, Li M, Tan G, et al. Research and application of key technologies for processing ocean bottom cable seismic data from the W Sag in the western South China Sea[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(3): 481-488. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1011

南海西部 W 凹陷 OBC 资料处理关键技术研究与应用

周凡[1], 李明[1], 谭港[1], 鲁统祥[1], 袁梦雨[1], 丑纪辉[2]
(1. 中海石油(中国)有限公司 湛江分公司, 广东 湛江 524057; 2. 中海油服物探事业部 特普数据中心(湛江), 广东 湛江 524057)

摘 要: 南海西部 W 凹陷勘探程度高, 多数油田已进入中高含水期, 挖潜难度高、稳产难度大, "双古"领域复杂隐蔽油气勘探及老油田精细挖潜成为增储上产的主要攻关方向。但在复杂地质条件下, 地震勘探面临着地震波场复杂、地震信号弱、分辨率低及各向异性强等多方面问题。本文针对南海西部复杂油藏勘探及开发中面临的难题, 结合宽方位 OBC 资料特点, 按照宽频保幅处理思路, 从鬼波压制、多次波压制和高精度速度建模等方面开展关键技术研究, 形成了一套针对复杂构造区 OBC 资料的关键技术体系, 有效改善了资料信噪比和成像效果。实际资料处理结果表明, 本文方法显著提高了地震资料品质, 为复杂油藏地球物理精细描述打下了坚实的资料基础。

关键词: 海洋地震勘探; 复杂构造区; OBC 地震资料; 宽方位地震处理; 多次波压制; 全波形反演; 南海西部
中图分类号: P31; P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)03-0481-08

0 引言

南海西部 W 凹陷中深层流沙港组勘探潜力巨大, 随着常规领域勘探程度越来越高, 剩余勘探潜力目标存在面积小、分布碎的特点。为突破上述勘探难题, 亟需向深层新区域拓展, 实现新区域的油气勘探[1]。深层复杂领域勘探对地震资料品质要求更高, 常规拖缆采集地震资料虽经过多批次重处理, 仍存在断层成像差、地震分辨率不足等问题, 尤其是面对复杂构造区的资料处理,传统方法难以充分发挥宽方位地震资料优势, 因而使得复杂构造圈闭落实和油藏描述存在较大不确定性[2], 难以满足勘探开发的需求。相较于传统海上拖缆地震资料, 海底电缆 OBC(ocean bottom cable)地震资料采集凭借覆盖次数高、方位宽、低频信息丰富和各向异性特征显著等优势, 更利于中深层复杂构造成像。因此, 在 W 凹陷相继采集了多块海底电缆地震资料, 覆盖了凹陷重点勘探区域, 获得了中深层成像大幅改善的高品质地震资料[3]。拖缆地震资料采集处理技术及流程已高度成熟应用, 而海底电缆地震资料的处理技术及流程正处在不断探索中, 在处理过程中如何最大限度地利用海底电缆地震资料、发挥其优势成为关键。

OBC 宽方位地震资料处理的关键技术主要是鬼波、多次波压制与速度建模, 它们直接影响着最终偏移成像结果的可靠性, 传统的交叉鬼波化和简单 PZ 合并鬼波压制方法的分辨率和信噪比较低; 常规 Radon 变换多次波压制方法分辨率低, 针对复杂数据适应性不强且容易受到各向异性的影响; 网格层析速度建模精度较低, 难以对复杂构造区速度体进行有效刻画。针对这些问题, 本文从鬼波压制、多次波压制和高精度速度建模 3 方面展开研究, 形成一套针对海上复杂构造区的宽方位地震资料处理技术体系。将本文方法应用到南海西部 W 凹陷 OBC 资料处理中, 充分发挥宽方位资料优势, 提升了地震资料信噪比, 有效改善中深层成像效果, 提高了地震资料的品质。新处理资料的应用也成功指导了砂体横向追踪解释及沉积认识更新, 在复杂构造区勘探开发、老油田极限挖潜以及岩性油藏滚动扩边中得到推广

收稿日期: 2025-01-10; **修回日期:** 2026-01-30
基金项目: 中海石油(中国)有限公司湛江分公司综合科研项目"北部湾盆地页岩油资源评价与有利区带预测"(KJZH-2023-2106)
第一作者: 周凡(1985-), 男, 高级工程师, 2012 年毕业于中国海洋大学, 主要从事油气地球物理研究工作。Email: zhoufan3@cnooc.com.cn

应用，为南海西部乃至其他海域的复杂构造勘探提供了重要技术参考。

1　复杂构造区宽方位地震处理关键技术

1.1　高精度三维复小波域变换 PZ 合并及鬼波压制技术

海洋宽方位 OBC 地震资料采集，由于震源和检波器沉放位于海水和海底两套强反射面之间，不可避免地会产生较强鬼波干扰。OBC 采集采用水检（*P* 分量）和陆检（*Z*、*X*、*Y* 分量）双检波器接收，水检 *P* 分量记录的是压力变换数据，其波场中同时包含上行波场和下行波场，而 *Z* 分量则是记录垂直方向的波场，即上行波场减下行波场。对于一次反射波而言，*P*、*Z* 分量数据的接收方向是一致的，但是对于海面反射的鬼波，二者接收到的信号极性相反，因此可以利用 *P*-*Z* 分量双检合并来消除鬼波信号[4]，如图 1 所示。

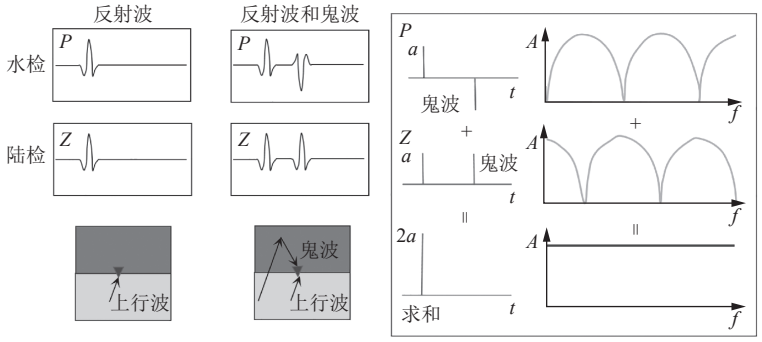


图 1　OBC 采集 *P*、*Z* 分量信号合并示意

Fig. 1　Schematic of merging *P* and *Z* component signals collected by OBC

因 *P*、*Z* 分量存在系统频率、振幅差异，不能直接进行 *PZ* 加和，常规处理流程采用交叉鬼波化方法对 *P*、*Z* 分量进行匹配然后加和，具有较好的压制效果。但利用该方法处理实际资料往往会存在鬼波旁瓣残留，影响地震资料的分辨率。为此，需要对 *P* 分量向 *Z* 分量匹配，而对中深层，该匹配方式容易造成目标区信噪比变差，影响后续偏移成像的效果。

与上述两种传统的 *PZ* 合并方法不同，本文利用三维复小波域变换 *PZ* 合并鬼波压制技术，通过在复小波域进行 5 维属性匹配再合并实现鬼波压制[5-6]。该方法首先对 *P*、*Z* 分量数据分别进行复小波域转换匹配，然后对 *P*、*Z* 分量进行 5 维局部属性匹配以实现噪声分离，最后将滤波后的 *Z* 分量进行逆向复小波转换以产生最终的滤波结果。其中滤波算子的表达式为：

$$\boldsymbol{Z}'[\boldsymbol{t},\boldsymbol{x},\boldsymbol{s},\boldsymbol{o},\boldsymbol{ri}]=\boldsymbol{Z}(\boldsymbol{t},\boldsymbol{x},\boldsymbol{s},\boldsymbol{o},\boldsymbol{ri})*|\boldsymbol{P}(\boldsymbol{t},\boldsymbol{x},\boldsymbol{s},\boldsymbol{o},\boldsymbol{ri})|*Envp, \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{Z}[\boldsymbol{t},\boldsymbol{x},\boldsymbol{s},\boldsymbol{o},\boldsymbol{ri}]$为 *Z* 分量小波变换后的五维系数矩阵，$\boldsymbol{tx}$为两个坐标向量；$\boldsymbol{s}$为比例向量；$\boldsymbol{o}$为方向向量；$\boldsymbol{ri}$为包含实部或虚部的向量；*Envp* 为包络缩放因子；$\boldsymbol{Z}$和$\boldsymbol{P}$分别为 *Z*、*P* 分量复小波变换后的振幅。

图 2 为 *PZ* 合并前后叠加剖面和频谱对比。在初始叠加剖面上存在大量鬼波干扰（图 2a、b），在经过基于三维复小波域变换进行 *PZ* 合并后，鬼波得到明显压制（图 2c）。从频谱特征对比看（图 2d），基于新方法 *PZ* 合并后的数据，陷波效应得到有效缓解，频谱形态更加完整，低频成分得到一定增强，更有利于深层成像。

1.2　基于低频约束的 3D-Radon 变换多次波压制技术

海上地震数据中多次波复杂，如何实现对多次波的高精度有效压制是地震数据处理中的重点、难点问题。Radon 变换多次波压制方法凭借原理简单、计算效率高等优势在实际生产中得到广泛应用[7]，但针对宽方位三维地震数据所形成的三维小面元道集，常规 Radon 变换方法一方面受到地层各向异性的影响容易出现同向轴抖动情况，无法很好地实现多次波压制，另一方面，数据在 Radon 域的分辨率较低，对复杂数据有效波和一次波的可分离性较差，影响了多次波的压制效果。本文综合考虑地震波场的传播特点和常规 Radon 变换分辨率低等问题，发展了基于低频约束的 3D-Radon 变换多次波压制技术[8-10]，在提高 Radon 变换分辨率的同时，直接通过对不同频率的迭代更新，提高了计算效率。

基于低频约束的 3D-Radon 变换的目标表达式为：

$$\boldsymbol{M}_n=\boldsymbol{W}_n\boldsymbol{L}_x^{\mathrm{H}}(\boldsymbol{L}_x\boldsymbol{W}_n\boldsymbol{L}_x^{\mathrm{H}}+\mu\boldsymbol{I})^{-1}\cdot\boldsymbol{D}_n(\boldsymbol{L}_y^{\mathrm{H}}\boldsymbol{V}_n\boldsymbol{L}_y+\mu\boldsymbol{I})^{-1}\boldsymbol{L}_y^{\mathrm{H}}\boldsymbol{V}_n, \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{M}_n$和$\boldsymbol{D}_n$分别表示第 *n* 个频率的三维 Radon 域

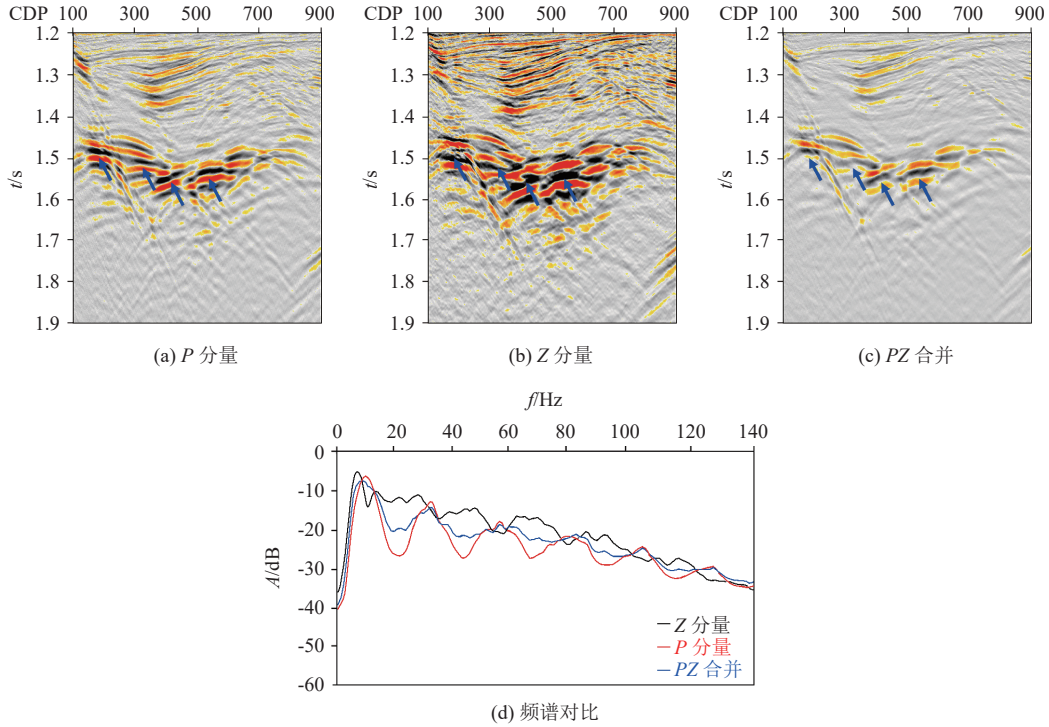


图 2　不同鬼波压制方法剖面和频谱对比

Fig. 2　Profile and spectrum comparison of different ghost wave suppression methods

和时间域地震数据; $\boldsymbol{L}_x = \mathrm{e}^{-\mathrm{i}fx^2}$, 为与 x 有关的算子; $\boldsymbol{L}_y = \mathrm{e}^{-\mathrm{i}fy^2}$, 为与 y 有关的算子; $\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵; μ 表示阻尼因子, 取值一般在 0.01~1.00 之间; $\boldsymbol{W}_n$ 和 $\boldsymbol{V}_n$ 分别表示纵测线和联络测线方向算子求逆时所对应的对角加权矩阵, 该矩阵由上一频率的计算结果得到。加权矩阵 $\boldsymbol{W}_n$ 可以表示为:

$$\boldsymbol{W}_{ii}(\omega_n) = \|\boldsymbol{M}_i(\omega_{n-1})\|, \qquad (3)$$

式中: $\boldsymbol{M}_i(\omega_{n-1})$ 由上一频率的计算结果得到; i 的取值范围为 $1 \sim n_{qx}$; 对应的对角加权矩阵 $\boldsymbol{V}_n$ 中 i 的取值范围为 $1 \sim n_{qy}$ (n_{qx} 和 n_{qy} 为曲率 qx 和 qy 的个数)。

与传统的 3D-Radon 变换方法相比, 利用该方法得到的 Radon 域数据的分辨率更高, 多次波与一次波的可分离性更好, 多次波压制更有效。如图 3 所示(图中-12 dB 为常用频谱分析参考点, 是有效频宽的界定值), 传统的 3D-Radon 变换多次波压制方法和低频约束的 3D-Radon 变换压制方法均能对多次波进行有效压制, 但传统方法分辨率较低且存在部分多次波残留, 而低频约束的 3D-Radon 变换方法对多次波压制得更为彻底, 频谱中陷波点得到进一步恢复。

1.3　FWI 全波形反演速度建模技术

速度模型的精度直接影响到偏移成像的真实性和准确性。常规基于网格层析速度反演方法对数据信噪比要求较高且难以实现对高频速度的刻画, 对深层复杂构造速度刻画精度较低, 影响着成像结果的准确性。全波形反演方法是目前最先进的一种高精度速度反演建模技术[11], 它依托采集的所有波形信息[12], 通过匹配模拟数据与观测数据来进行地下介质模型的构建, 然后不断迭代更新初始速度模型, 减小正演数据与实际数据之间的误差, 从而不断逼近真实的速度模型[13]。该技术能够充分利用反射波、透射波等全波形信息, 稳定反演低频速度背景趋势, 同时提升高频速度反演的稳定性, 因此在实际地震资料处理中逐步得到应用[14-16], 尤其是针对低频较丰富、偏移距较长的宽方位 OBC 资料, 适应性更强。

全波形反演方法的核心在于通过不断迭代更新得到一个精确的速度模型, 使利用该模型正演出的数据 $\tilde{d}$ 和实际采集的数据 d 之间的误差 $E(m)$ 最小:

$$E(m) = \frac{1}{2}\|d - \tilde{d}\|_2^2 = \frac{1}{2}\|\boldsymbol{D}\boldsymbol{p} - d\|_2^2 = \frac{1}{2}\|\boldsymbol{D}\boldsymbol{F}(m)\boldsymbol{s}(t) - d\|_2^2 = \min, \qquad (4)$$

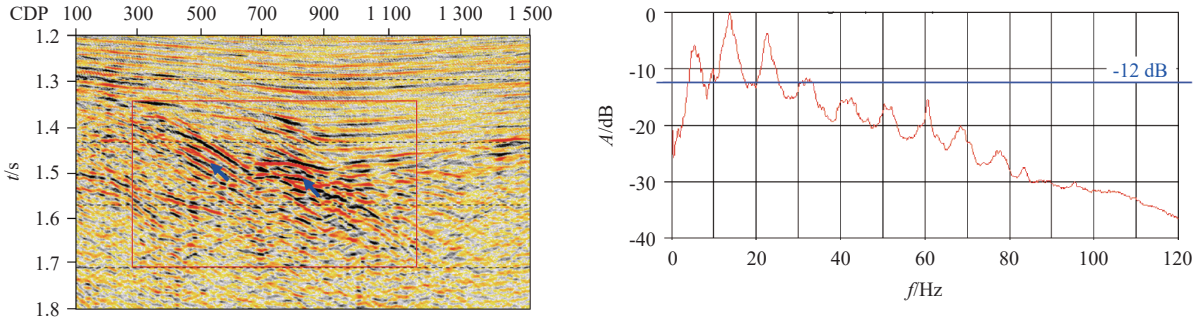
式中: $\boldsymbol{F}(m)\boldsymbol{s}(t)$ 表示传播算子; $\boldsymbol{s}(t)$ 代表震源子波; $\boldsymbol{p}$ 代表地震波场。

$$\boldsymbol{F}(m)\boldsymbol{s}(t): \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - m\nabla^2\right)\boldsymbol{p}(\vec{x};t) = \delta(\vec{x} - \vec{x}_s)\boldsymbol{s}(t), \qquad (5)$$

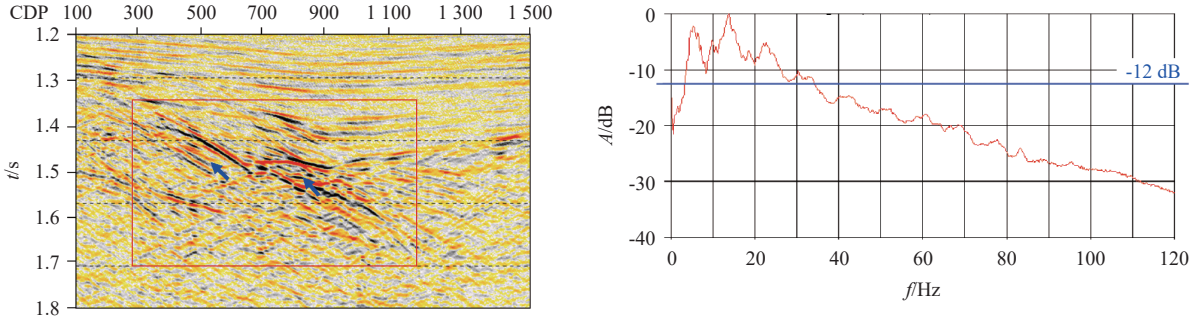
求取误差最小值, 使 $E(m)$ 导数为 0:

$$\frac{\partial E}{\partial m} = \left(\frac{\partial \tilde{d}}{\partial m}\right)(\tilde{d} - d) = (\nabla^2\boldsymbol{p})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{F}^{-1})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}(\tilde{d} - d) = 0。 \qquad (6)$$

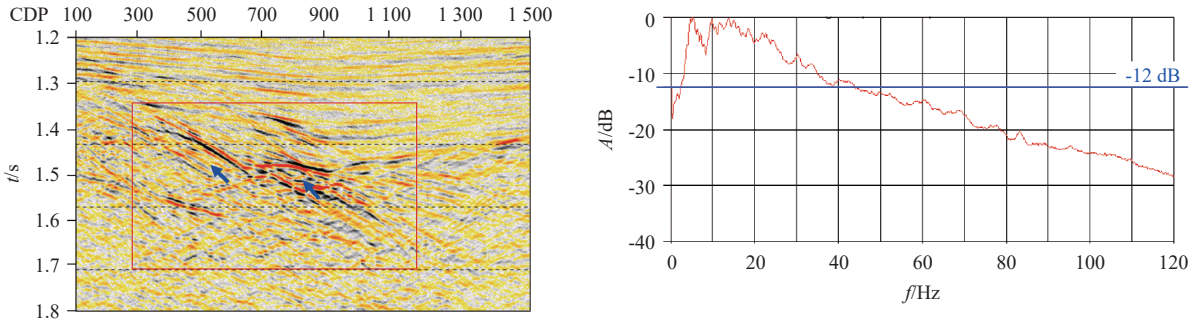
通过正演模拟和目标函数最小值最优化算法求



(a) 多次波压制前



(b) 常规 3D-Radon 变换多次波压制



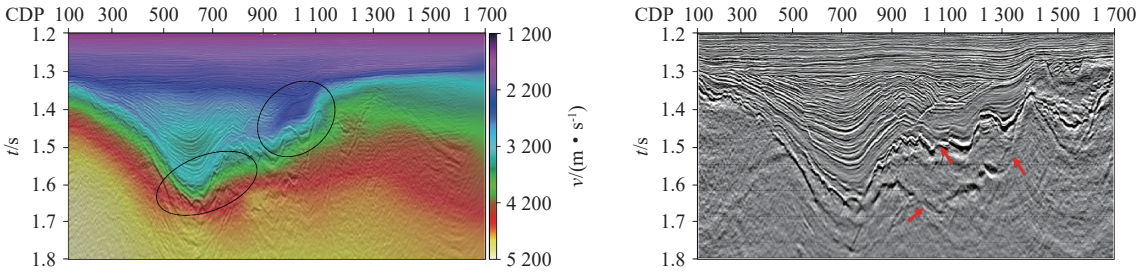
(c) 基于低频约束的 3D-Radon 变换多次波压制

图 3　3D-Radon 变换的多次波压制叠加剖面及对应的频谱

Fig. 3　Multi wave suppression superposition profile and corresponding frequency spectrum based on 3D Radon transform

解，最终得到精确的速度模型 m。

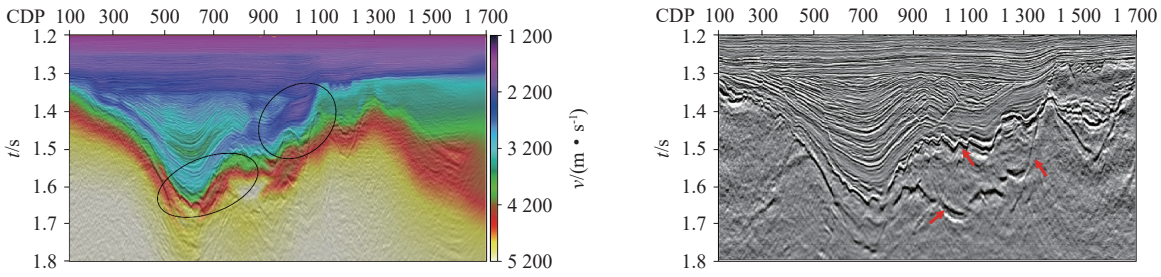
利用全波形反演技术建立的速度模型，复杂断块速度刻画更为精细，偏移成像后复杂构造成像效果和成像精度得到明显提升。图 4a 显示，层析速度剖面对应的深度偏移剖面中，复杂断层边界速度无法刻画，断面收敛较差，断层下方存在明显的断层阴影。图 4b 为利用全波形反演技术建立的速度模型和对应的深度偏移剖面，对比之下，该方法建立的速度模型断层边界刻画清晰，地层内部速度精度显著提高，中深层速度与构造一致性更好；从成像剖面也可以看到断层成像更加清楚干脆，断层下方的断层阴影得以消除。



(a) 层析速度剖面（左）及其偏移剖面（右）

图 4-1　基于不同速度的成像结果对比

Fig. 4-1　Comparison of imaging based on different velocities



(b) FWI 速度剖面（左）及其偏移剖面（右）

图 4-2　基于不同速度的成像结果对比

Fig. 4-2　Comparison of imaging based on different velocities

2　实际应用效果

南海西部 W 凹陷中深层流沙港组 (图 5 黑框内) 是主要的勘探目标区, 勘探潜力巨大。但该区域地质条件复杂、断层发育、地震信号弱, 虽然采集了宽方位、大偏移距和高覆盖次数的 OBC 资料, 但是常规处理技术针对性不足, 难以改善目标区中深层成像, OBC 资料优势挖掘程度有限。如图 5 所示, 常规处理方法获得的成果剖面(以下简称老资料)整体信噪比较低, 目标层流三段断层和地层成像较差, 潜山内幕反射波组不清, 难以满足勘探要求。

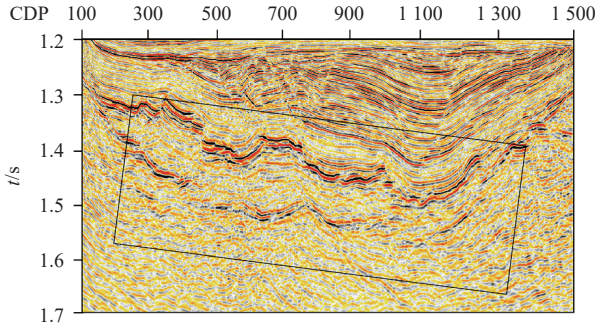


图 5　W 凹陷传统方法成像结果

Fig. 5　Imaging results of W depression using conventional methods

针对老资料存在的中深层能量弱、信噪比低和断层地层成像差问题, 采用鬼波、多次波压制和速度建模等关键技术组合, 建立起一套针对性技术体系(图 6), 既提升了资料信噪比、保护了潜山内幕的低频信号, 同时建立了更准确的速度模型, 有效提升资料的成像效果。

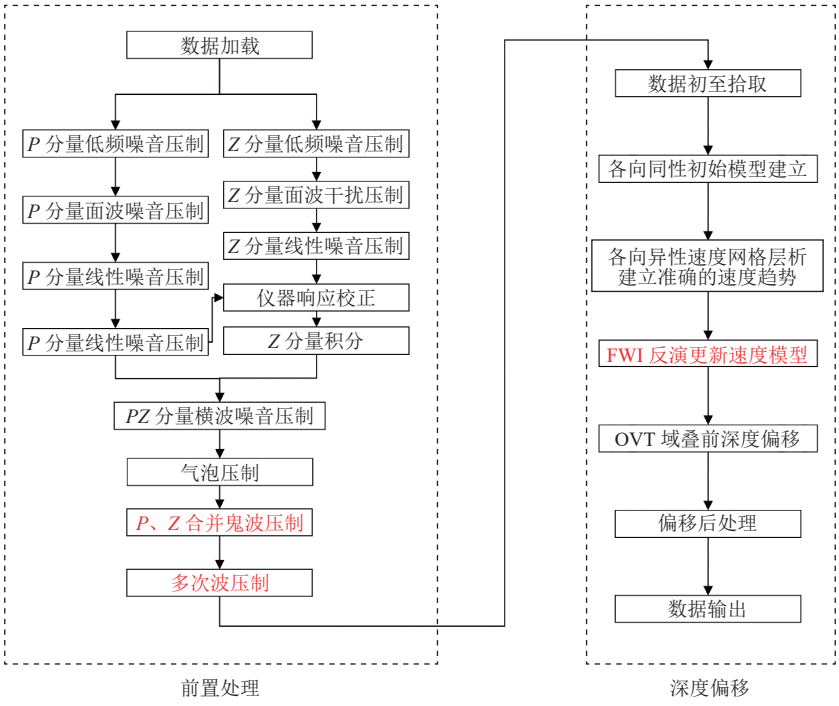
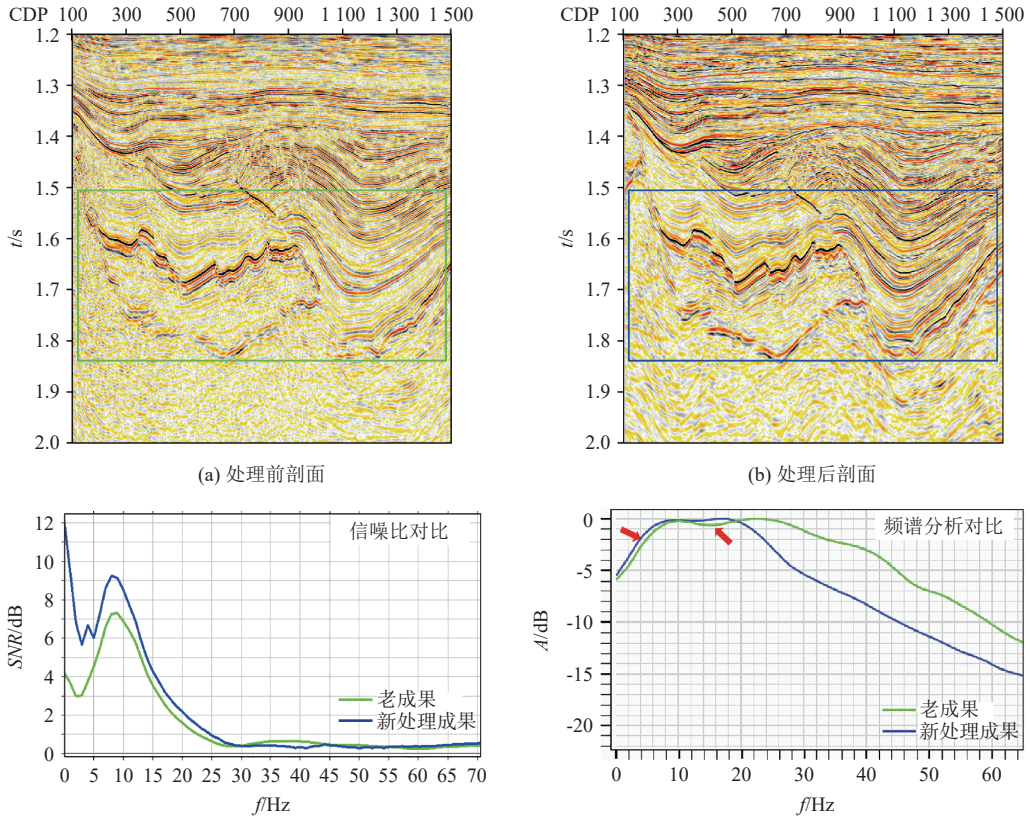


图 6　处理流程

Fig. 6　Processing workflow diagram

图 7 是利用本文方法处理的成果与老资料的对比结果。新方法采取高精度三维复小波域变换 PZ 合并及鬼波压制技术和低频约束 3D-Radon 变换多次波压制技术，在提高资料信噪比的同时较好地消除了检波点端鬼波陷波的影响，低频信息得到恢复，有利于中深部地层成像精度的提高。



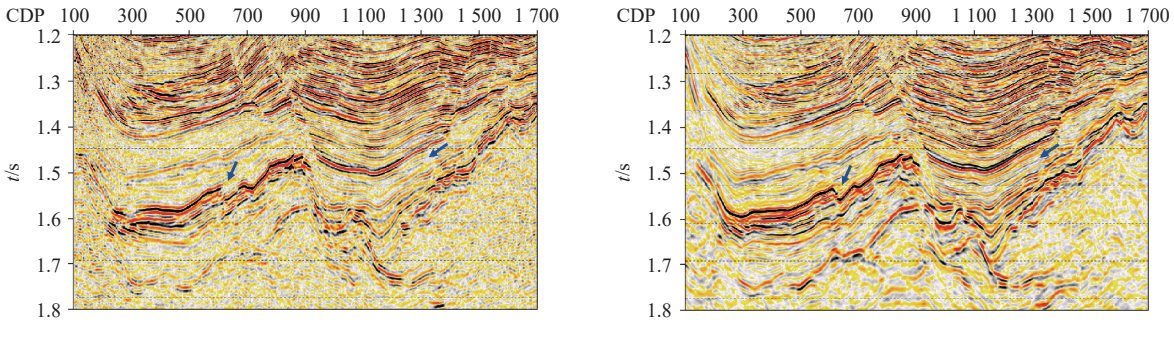
(a) 处理前剖面　　(b) 处理后剖面

(c) 中深层信噪比、频谱对比

图 7　新方法处理前后的剖面及信噪比、频谱对比

Fig. 7　Comparison analysis before and after processing

本次处理还利用全波形速度反演技术建立了精细准确的速度模型，符合地质认识，有效改善了该地区流沙港组地层及断裂系统的成像效果(图 8)。图 8a 显示老资料的中深层信噪比较低，目标区同相轴连续性差，构造、断裂模糊。图 8b 为采用新方法处理的地震剖面，可见同相轴连续性得到明显改善，信噪比提升，断裂系统及断面成像清晰，对油气疏导体系和油气运移判断极为有利。同时，新处理结果由于速度体精度的提升，流沙港组页岩油及薄互层有利储层、小断块、基底及潜山等复杂构造的成像得到改善，为 W 油田流沙港组流一段和流三段油藏精细构造落实提供了更可靠的资料基础。



(a) 老资料处理成像结果　　(b) 新处理成像结果

图 8　不同方法处理前后的成像效果对比

Fig. 8　Comparison of imaging results before and after processing

3　结论

针对南海西部 W 凹陷宽方位 OBC 数据处理的重点、难点, 从鬼波压制、多次波压制和高精度速度建模等关键问题出发, 形成针对复杂构造区的 OBC 资料处理技术, 实际应用效果验证了处理技术的有效性。

1)应用高精度复小波域 PZ 合并鬼波压制技术, 有效削弱陷波效应, 丰富低频信息, 为深层成像奠定基础。

2)基于低频约束 3D-Radon 变换的多次波压制技术, 进一步对多次波进行压制, 使陷波点恢复得更好, 资料信噪比提升。

3)采用全波形反演技术进行速度建模, 有效提高速度建模精度, 改善叠前深度偏移成像质量, 提升断层和基底成像精度。

采用以上 OBC 处理关键技术,有效改善了地震资料品质, 在复杂构造区勘探开发、老油田极限挖潜以及岩性油藏滚动扩边中可进行推广应用, 为钻井提供了可靠的资料支撑。研究结果对南海西部乃至其他海域复杂构造地震资料处理具有一定的借鉴意义。

参考文献(References):

[1] 胡德胜, 宫立园, 满晓, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷雁列断层变换带发育特征及其控储作用——以古近系流沙港组一段重力流沉积为例 [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1359−1369.
Hu D S, Gong L Y, Man X, et al. Development pattern of en echelon fault transition zone in Weixi′nan Sag, Beibu Gulf Basin and its control on hydrocarbon accumulation: A case study of gravity flow deposits in the Palaeogene Liu 1 Member[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1359−1369.

[2] 焦叙明, 张鹏, 陈磅, 等. 涠西南凹陷复杂构造区海底电缆观测系统设计与优化 [J]. 工程地球物理学报, 2020, 17(3): 312−318.
Jiao X M, Zhang P, Chen P, et al. Design and optimization of the OBC geometry in Weizhou depression with complex structure[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2020, 17(3): 312−318.

[3] 徐长贵, 邓勇, 范彩伟, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷页岩油地质特征与资源潜力 [J]. 中国海上油气, 2022, 34(5): 1−12.
Xu C G, Deng Y, Fan C W, et al. Geological characteristics and resource potential of shale oil in Weixinan sag of Beibu Gulf Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(5): 1−12.

[4] Barr F J. Dual-sensor OBC technology[J]. The Leading Edge, 1997, 16(1): 45−52.

[5] Peng C, Huang R X, Asmerom B. Shear noise attenuation and PZ matching for OBN data with a new scheme of complex wavelet transform[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013. Society of Exploration Geophysicists, 2013: 4251-4255.

[6] Yu Z, Kumar C, Ahmed I. Ocean bottom seismic noise attenuation using local attribute matching filter[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011. Society of Exploration Geophysicists, 2011: 3586-3590.

[7] Hampson D. Inverse velocity stacking for multiple elimination [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 1986. Society of Exploration Geophysicists, 1986: 422−424.

[8] Ma J T, Xu G Y, Chen X H, et al. Multiple attenuation with 3D high-order high-resolution parabolic Radon transform using lower frequency constraints[J]. Geophysics, 2020, 85(3): V317−V328.

[9] Sacchi M D, Ulrych T J. High-resolution velocity gathers and offset space reconstruction[J]. Geophysics, 1995, 60(4): 1169−1177.

[10] Sacchi M D, Porsani M. Fast high resolution parabolic Radon transform[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 1999. Society of Exploration Geophysicists, 1999: 1477-1480.

[11] Virieux J, Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics[J]. Geophysics, 2009, 74(6): WCC1−WCC26.

[12] Tarantola A. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation[J]. Geophysics, 1984, 49(8): 1259−1266.

[13] Warner M, Guasch L. Adaptive waveform inversion: Theory[J]. Geophysics, 2016, 81(6): R429−R445.

[14] 杨瑞冬, 黄建平, 杨振杰, 等. 基于双对角通量校正的多尺度全波形反演 [J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(5): 1120−1128, 1004.
Yang R D, Huang J P, Yang Z J, et al. Multi-scale full waveform inversion based on double diagonal flux correction transport[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(5): 1120−1128, 1004.

[15] 姚含, 徐海. 基于梯度投影法的全变差正则化全波形反演 [J]. 物探与化探, 2022, 46(4): 977−981.
Yao H, Xu H. Total variation regularized full waveform inversion based on gradient projection method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4): 977−981.

[16] Xuan Y H, Zhang Z B, Hu Y, et al. Adaptive full-waveform inversion based on nonstationary phase correction in TTI media[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017. Society of Exploration Geophysicists, 2017: 1633-1637.

Research and application of key technologies for processing ocean bottom cable seismic data from the W Sag in the western South China Sea

ZHOU Fan[1], LI Ming[1], TAN Gang[1], LU Tong-Xiang[1], YUAN Meng-Yu[1], CHOU Ji-Hui[2]

(1. *Zhanjiang Branch, CNOOC (China) Limited, Zhanjiang* 524057, *China*; 2. *Top Data Center (Zhanjiang), Geophysical Exploration Division, China Oilfield Services Limited, Zhanjiang* 524057, *China*)

Abstract: The W Sag in the western South China Sea has been extensively explored. Consequently, most oilfields in the sag have transitioned into the medium to high water cut stage, facing challenges in tapping potential reserves and maintaining stable production. In this context, both hydrocarbon exploration in complex concealed reservoirs in the Paleogene strata and paleo-buried hills and fine-scale potential tapping in mature oilfields have become primary targets for reserve growth and production addition. However, under complex geological conditions, seismic exploration faces multiple issues, including complex seismic wavefields, weak seismic signals, low resolution, and strong anisotropy. To address the challenges encountered in the exploration and exploitation of complex reservoirs in the western South China Sea, this study investigated key technologies in terms of ghost wave suppression, multiple suppression, and high-precision velocity modeling. To this end, the characteristics of the acquired wide-azimuth ocean bottom cable (OBC) seismic data were considered, and the approach to broadening frequencies and preserving amplitude was followed. Consequently, a set of key technologies for processing the OBC seismic data of structurally complex areas was established, effectively improving the signal-to-noise ratio and imaging quality of seismic data. Application to actual data demonstrates that the technologies established in this study substantially enhanced seismic data quality, laying a solid foundation for the fine-scale geophysical characterization of complex reservoirs.

Key words: offshore seismic survey; structurally complex area; ocean bottom cable (OBC) seismic data; wide-azimuth seismic processing; multiple suppression; full-waveform inversion (FWI); western South China Sea

（本文编辑：叶佩，沈效群）