

南海深反射地震关键处理技术研究及应用*

边冬辉¹, 张宝金^{1,2}, 刘玉萍^{1,2}, 徐云霞^{1,2}, 张如伟^{1,2}, 彭科¹

1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458
2. 自然资源部海底矿产资源重点实验室 / 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760

摘要: 南海深海盆地海底和基底崎岖、地下地质构造复杂, 这些因素使得地震资料发育大量的复杂多次波和绕射波, 同时, 受鬼波影响, 深反射地震剖面低频信号损失严重, 这给中深层目标成像带来了巨大挑战。针对南海二维深反射地震资料深层低频信息能量弱、复杂多次波发育、复杂绕射波干扰严重问题, 采用自适应鬼波去除、组合法复杂多次波压制、多属性联合复杂绕射波衰减 3 项关键技术进行攻关处理, 最终实际资料处理结果表明, 深部弱反射信号低频成分 5 ~ 13 Hz 能量得到明显增强, 深部地层信噪比从 5 提高到 10, 疑似莫霍面成像改善明显, 为后续综合地质研究奠定了坚实基础。

关键词: 深反射地震; 自适应鬼波压制; 组合多次波衰减; 复杂绕射波衰减

中图分类号: P714^{+.8} **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2022) 01-0074-10

Research and application of deep reflection seismic processing technology in South China Sea

BIAN Donghui¹, ZHANG Baojin^{1,2}, LIU Yuping^{1,2}, XU Yunxia^{1,2}, ZHANG Ruwei^{1,2}, PENG Ke¹

1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China
2. Key Laboratory of Marine Resources, Ministry of Natural Resources / Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China

Abstract: The seabed and base of the deep-sea basin area of the South China Sea are rugged and have complex underground geological structures. These factors make a large number of complex multiple-waves and diffraction waves of seismic data develop. Meanwhile, caused by ghost waves, the low-frequency signal loss of deep reflection seismic profile is severe, which brings great challenges to the imaging of middle and deep targets. Concerning the problems of weak energy of deep low-frequency signal, the development of complex multiples and serious interference of diffraction waves in the 2D seismic data of the South China Sea, three key processing techniques, namely adaptive ghost wave removal, complex multiple wave combination suppression method and multi-attribute constrained complex diffraction attenuation, are adopted. The actual seismic data processing results show that: the deep 5-13 Hz low-frequency signal energy has been significantly enhanced, the signal-to-noise ratio has been increased from 5 to 10, and the suspected Moho imaging has improved significantly, which provides reliable basic data for subsequent comprehensive geological research.

Key words: deep seismic reflection; adaptive ghost suppression; combined multiple attenuation; complex diffraction wave attenuation

* 收稿日期: 2021-07-23 录用日期: 2021-10-27 网络首发日期: 2021-12-13
基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0207)
作者简介: 边冬辉(1982年生), 男; 研究方向: 深反射地震处理技术; E-mail: bdh915@163.com

南海深海盆区勘探潜力巨大^[1-3],已成为国家油气勘探潜在的储量和产量接替区,同时,也是深部地质结构研究的重要区域。随着海上油气勘探和深部地质结构研究的不断深入,迫切需要针对南海深海盆区深反射地震资料特点,研究和发

展适用的深反射地震处理技术。海上常规水平拖缆地震采集的记录受海水面的鬼波影响,存在陷波特性,使得地震记录的频带变窄^[4],低频损失严重^[5],对中深层成像极为不利。此外,南海深海盆区海底地貌复杂,海底受构造运动和海水侵蚀影响,海山发育、崎岖不平、水深变化大,同时,地下受多期构造运动影响,构造复杂,断层、特殊地质体发育,岩性变化快^[6],导致地震波波场复杂,而目前普遍采用的二维地震观测方式,接收到了大量观测平面以外的三维波场信息,直接导致二维地震资料发育大量的复杂多次波和绕射波,这给中深层目标成像带来了挑战。

针对上述鬼波压制、复杂多次波及绕射波衰减,国内外专家学者做了大量的研究工作。目前,鬼波压制主要集中在采集和处理两个阶段,采集阶段通过宽频采集压制鬼波,基本思想是通过设计观测方式控制陷波点分布,再采用针对性的数据处理方法压制鬼波。部分宽频采集技术取得了很好的效果,但由于采集工程技术要求较高、成本较大等原因,常规水平拖缆采集仍然是业界主流^[7]。对于常规水平拖缆鬼波压制,Jovanovich等^[8]根据地震记录是反射波与鬼波算子褶积的假设,采用反褶积处理方法压制鬼波,但该方法由于鬼波算子存在零值点,所以不能完全消除鬼波。Fokkema等^[9]最早给出了频率波数域波场外推法去鬼波方法;Weglein等^[10]提出将逆散射级数法(ISS)用于鬼波和多次波压制;李翔和胡天跃^[11]研究了逆散射级数法压制自由表面多次波的理论,并用于实际资料;王芳芳等^[12]提出在频率-波数域内构造鬼波压制算子,利用逆散射级数法压制鬼波,但是ISS处理过程是非线性相关的,容易产生线性误差。Wang等^[13]在频率波数域波场外推的基础上进一步发展了寻优水检深度的Bootstrap方法。实际应用中上述鬼波压制方法虽然取得一定效果,但由于预测和压制融合在一个滤波器中,限制了对鬼波的预测和压制能力。

多次波衰减方法的研究一直都是海洋地震资

料处理重点,目前已发展了大量有效的方法,Weglein^[14]将这些方法归结为两大类:滤波法和波动理论法。滤波法基于一次波和多次波之间速度、周期、倾角等差异进行一次波和多次波分离,如FK滤波^[15-16]、RADON滤波^[17-18]、聚束滤波^[19]等方法。而波动理论法则是从波动理论出发,建立多次波预测模型,然后通过自适应相减去除预测的多次波,典型方法有波场外推法^[20-21]、SRME^[22]、逆散射级数法^[23]。滤波法的原理简单,效率高,在多次波和一次波特征差异明显时,效果较好。波动理论法虽然计算较为复杂,但保幅性更好,适用性更广泛。两类多次波衰减方法的结合,可以弥补每种方法各自的局限性,是目前复杂多次波衰减的有效思路。

本文结合南海超过2 000 km二维深反射地震资料,详细梳理了影响中深部地层成像的三方面难点,即鬼波导致的低频信息能量弱、复杂多次波和绕射波发育降低了深部资料信噪比,并在前人研究基础上,针对上述难点,对现有处理方法和流程进行了甄选和优化,研究测试了自适应鬼波去除、组合复杂多次波压制和多属性联合复杂绕射波衰减3项关键技术,最终有效改善了深反射地震资料的深层成像质量。

1 原始资料分析

研究区位于南海东北部,跨越了陆坡、海盆和海沟,水深2 000~4 600 m,其深部地质构造特征、地壳结构变化、热流分布都具有独有的特征,该区域地震成像研究对于研究南海形成演化具有重要作用。

1.1 鬼波影响低频信号能量

地震信号低频信息相对高频具有衰减慢、穿透能力强的特点,因此,增强南海深反射地震资料低频能量对中深层成像至关重要。海洋地震勘探中,消除鬼波影响是提高地震频带宽度的最主要因素。

表1为南海深海盆区某典型区域二维拖缆地震资料采集参数。可见,电缆沉放深度11 m,气枪沉放深度8 m。通过图1原始单炮数据和频谱可以看出,受鬼波影响,频带存在陷波效应,陷波频率为80和170 Hz左右。本次地震数据的高频截止频率和第二个限波点频率80 Hz接近,因此鬼波对资料的高频信息影响较小。由于理论上震源鬼波

和电缆鬼波的起始陷波频率都是 0 Hz, 这使得地震资料中的低频分量迅速衰减。因此有效衰减鬼波, 提高中深层低频信号能量是南海深海盆区地震资料处理的一个难点。

表1 南海深海盆区典型二维地震数据采集参数
Table 1 Acquisition parameters of deep reflection
2D seismic in the South China Sea

参数	数值	参数	数值
电缆道	480	记录长度/s	12
道间距/m	12.5	采样率/ms	2
炮间距/m	37.5	气枪深度/m	8
最小偏移距/m	225	电缆深度/m	11
最大偏移距/m	6212.5	覆盖次数	80

1.2 复杂多次波发育

受复杂的海底地貌及地质条件影响, 多次波的类型及特征较复杂。如图2, 原始叠加剖面发育与海底和自由表面有关的规则长周期多次波, 崎岖海底引起的复杂绕射多次波。随着海底以下地层深度的增加, 反射地震信号能量衰减严重, 而海底多次波主要在海水中传播, 相对衰减较少, 能量较强, 会直接影响下伏地层的地震反射信号, 尤其是对深层反射具有较强的干扰作用, 从而影响地震成像的真实性和可靠性。因此, 针对复杂多次波的特征, 研究针对性的多次波衰减技术, 达到有效衰减复杂多次波, 提高中深层信噪比, 是南海深反射地震处理面临的另一难点。

1.3 复杂绕射波发育

从图3原始共偏移距剖面可以看出, 在海底与

海底全程多次波之间, 发育许多双曲线形态的绕射波场, 该绕射波的能量较强, 覆盖的范围较大, 传播速度约为 1 600 m/s, 主要在海水中传播。这些复杂绕射波传播特征十分复杂, 主要与崎岖海底和沉积层有关。各绕射波场相互重叠, 互相干涉, 严重干扰地震解释。由于复杂绕射波的地震波动力学特征与有效反射波类似, 因此, 现有的只考虑单一振幅、倾角、频率的地震波特征差异的各类噪音衰减方法很难进行去除。

2 对策及效果

2.1 自适应鬼波去除技术

Rickett^[24-25]提出了基于平面波分解的自适应鬼波去除方法, 该方法将地震数据在平面波($\tau - p$)域进行稀疏分解, 然后通过反正切和平滑算子对一次波和鬼波时差进行约束, 假设在较小的局部分析时窗内, 电缆倾角不变, 最后通过基于L1范数的稀疏反演求取鬼波延迟算子和上行波场。该方法可用于二维或三维水平电缆或斜缆数据, 可同时消除激发点、接收点鬼波效应, 对水速、激发点和接收点深度误差容忍度大。该方法目标函数方程中的L1阻尼因子和权重参数对最终鬼波分离效果影响很大, 较大的L1阻尼因子会增加模型的稀疏度, 增加鬼波分离误差, 合适的L1阻尼因子可以防止稀疏反演的过拟合问题, 提高反演精度。权重梯度系数类似于AGC的作用, 合适的权重梯度系数可以减少大振幅对目标函数的敏感性, 增加小振幅对目标函数的敏感性, 提高反演过程的精度和稳定性。本次攻关处理通过对输入

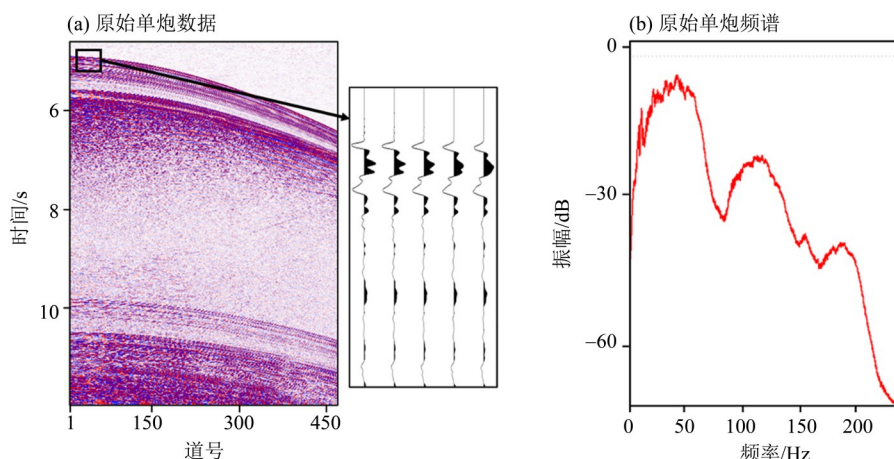


图1 原始单炮数据及其频谱

Fig. 1 Original single shot data and its frequency spectrum

波场加权数据和鬼波分离结果的详细分析和测试, 最终选择 L1 阻尼因子 15, 权重梯度系数 0.05。

图 4a 和图 4b 是鬼波压制前后炮集, 可见, 鬼波去除后资料波组特征更合理, 地层反射界面更突出, 分辨率得到提升, 箭头所示的深层低频弱信号得到增强。从图 4c 频谱上可见, 鬼波衰减后, 消除了陷波效应, 拓宽了数据频带, 尤其是低频成分能量得到显著增强。图 5 为去鬼波前后的叠加剖面, 如红框所示, 去鬼波后深层低频信息更丰富, 弱反射信号得到增强, 成像更清楚, 有利于后续精细地震解释。

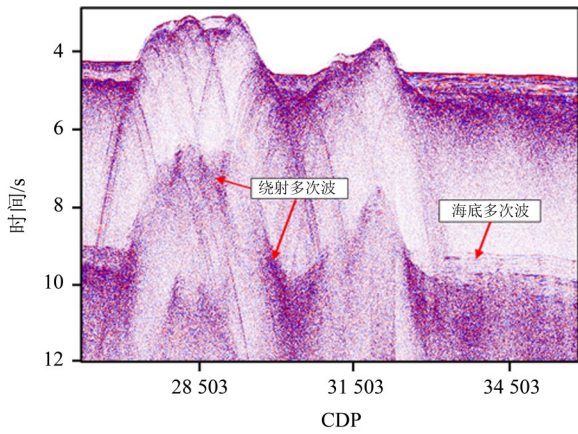


图 2 原始叠加剖面
Fig. 2 The original seismic stack profile

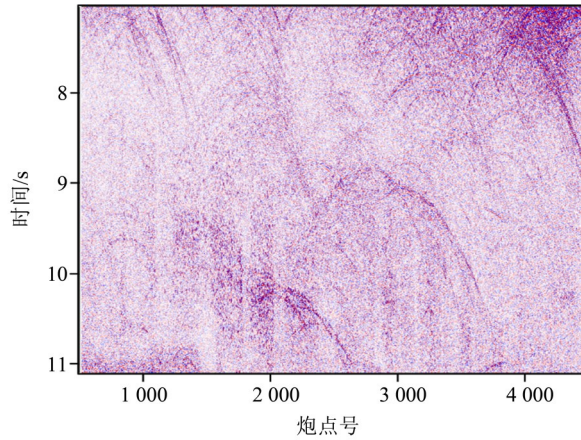


图 3 原始共偏移距剖面
Fig. 3 The original common offset profile

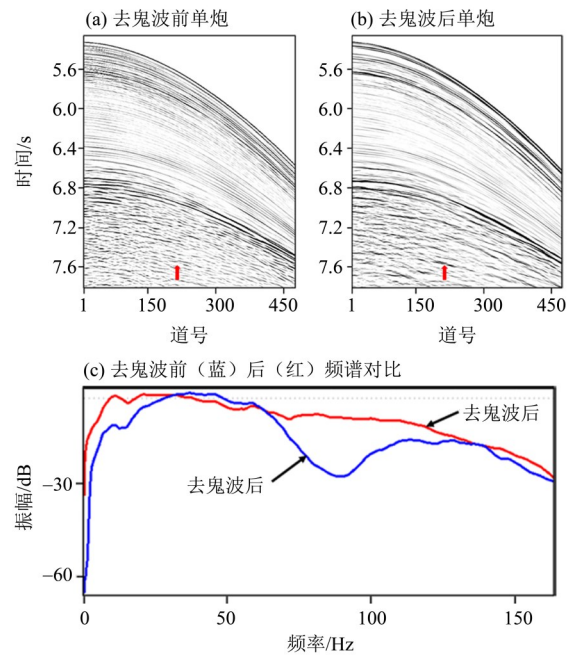


图 4 去鬼波前后单炮及频谱
Fig. 4 Single shot and spectrum before and after ghost wave removal

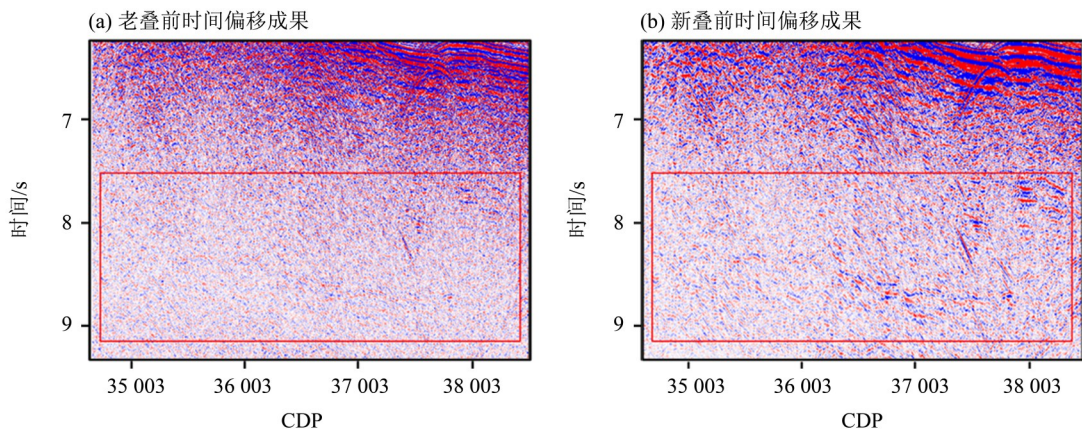


图 5 去鬼波前后叠加剖面对比
Fig. 5 Comparison of stack before and after ghost wave removal

2.2 组合复杂多次波压制

针对南海深海盆区地震资料多次波特征的复杂性,首先对多次波进行分类,针对每一类特征的多次波,分步采用适用的衰减方法。对于与自由表面有关的多次波,采用SRME方法进行衰减;对于剩余的中远偏移距动校时差较大的多次波,采用CMP域高精度Radon变换方法衰减。对于不规则多次和复杂绕射多次波,采用F-X预测滤波方法进行衰减。具体处理流程如图6。

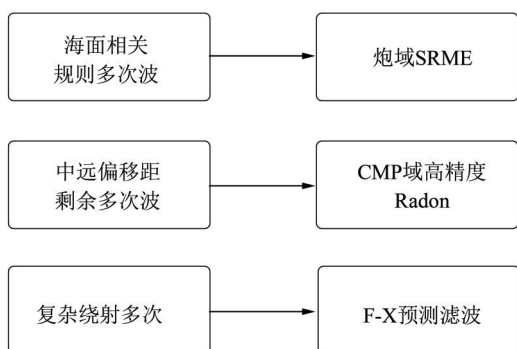


图6 组合复杂多次波压制流程

Fig. 6 Combined complex multiple suppression flow

2.2.1 SRME规则多次波衰减

SRME去多次波方法^[26]通过地震数据与自身进行时间-空间域褶积来预测多次波模型,低级次的多次波通过褶积运算可以构成高级次多次波,然后再利用自适应相减的方法去除多次波。该方法的优势在于预测过程不需要给定地下介质任何先验信息,可以估计出所有与自由表面相关的多次波,压制近炮检距的多次波效果更明显。

SRME衰减多次波包含两步,一是多次波模型预测,二是自适应相减。本次在SRME处理前,首先对涌浪噪音等异常大值振幅干扰进行了去除,然后采用Radon变换的方法对数据的近偏移距进行了补道和插值,从而提高SRME预测多次波模型的精度。自适应相减基于最小二乘方法,采用先大时窗后小时窗反复修正多次波模型再相减的方法。图7a、图7b为SRME去多次波前后单炮对比,图8a、图8b是SRME去多次波前后剖面对比,可见SRME处理后,去除了大量的自由表面多次波,同时,剖面的背景变化较小,表明该方法的保幅性较好。

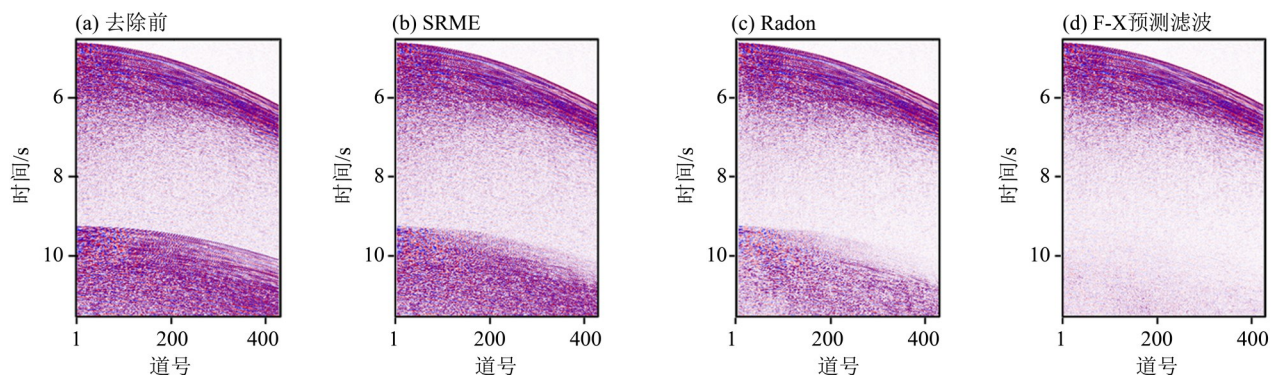


图7 组合压制多次波单炮效果图

Fig. 7 Combination suppression multiple single shot effect

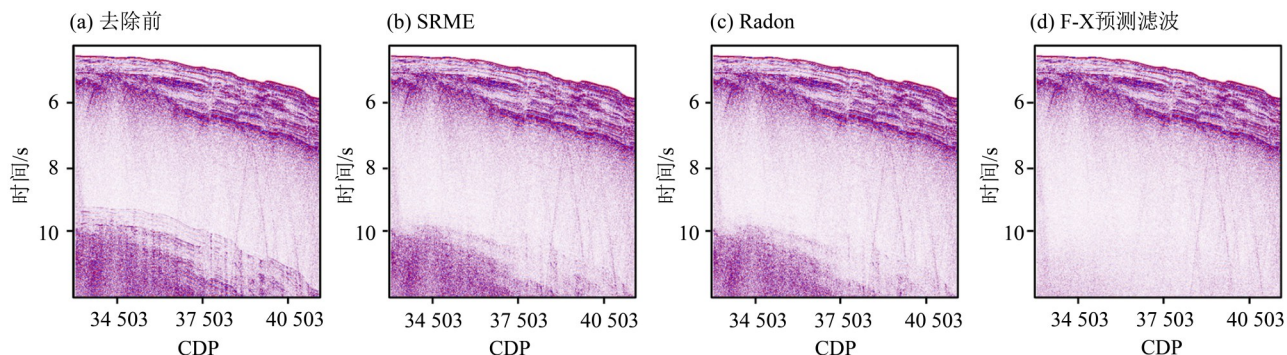


图8 组合压制多次波叠加剖面效果图

Fig. 8 Combination suppression multiple stack profile effect

2.2.2 Radon中远偏移距多次波衰减 SRME自由表面多次波衰减后,记录中仍残留较强多次波,考虑中远偏移距一次波和多次波存在明显动校时差差异,因此采用高精度Radon变换方法来进行中远偏移距多次波压制。实际处理中,为了提高Radon变换滤波衰减多次波的保幅性,首先利用Radon变换将多次波模型提取出来,再变换到时间-空间域,然后应用自适应相减的方式从原始数据中减掉中远偏移距多次波。由于Radon变换提取多次波的效果依赖于动校速度的精度,因此采用了速度和Radon迭代的方式进行了多次波衰减,具体实现过程是首先对存在大量多次波干扰的数据进行第一次速度分析,然后在Radon域选择较为保守的切除参数提取部分多次波,从数据中去除部分多次波,然后再利用去除部分多次波的数据进行第二次速度分析,得到相对准确的动校速度,再动校变换到Radon域,此时由于动校速度较为准确,因此可以大胆选择合理的切除参数提取多次波,最后从原始数据中彻底衰减多次波。本次这种迭代的处理方式,可以避免因动校速度不准,导致去除多次波过程中伤害一次反射。本次采用的Radon迭代去多次波方法是一种更保幅的去多次波方法。图7b、图7c为Radon迭代方法衰减多次波前后的单炮,图8b、图8c为Radon迭代方法衰减多次波前后的叠加剖面,可见, Radon变换方法进一步衰减了多次波能量。

2.2.3 F-X预测滤波残留多次波衰减 由于深水复杂地质条件、崎岖海底、海山发育等因素影响,经过SRME和Radon处理后的地震数据,仍然残留许多复杂的绕射多次波。针对残留绕射多次波在炮域具有的能量较强、相干、与一次波存在动校时差差异的特点,采用了基于F-X预测滤波的复杂绕射多次波衰减方法^[27-28]。该方法原本是应用于海洋外源干扰压制,考虑到复杂绕射多次波具有的相干性和能量较强的特点,本文将该方法应用于复杂绕射多次压制。具体实现步骤是:

1) 首先对数据进行动校正,然后将数据按图9所示进行排列得到数据 $d(t, x, y)$;

2) 选定较小时窗(例如10炮 \times 5道 \times 500ms),做时间方向的一维傅里叶变换得到数据 $d(f, x, y)$;

3) 对每一个频率数据,给定频率切片阈值和相邻炮阈值,如果当前炮平均振幅值和这个频率切片的平均振幅值之比超过频率切片阈值,同时,

当前炮平均振幅值和相邻4炮的平均振幅值之比也超过相邻炮阈值,那么认为这炮存在残留绕射多次波。对所有频率切片数据均做上述处理,直到检测出所有的含有残留绕射多次波的炮数据;

4) 构建三点预测误差滤波器,并对含有绕射多次波的单炮进行滤波处理,滤波器的作用类似于从当前道子波减去左右相邻两道子波的平均。

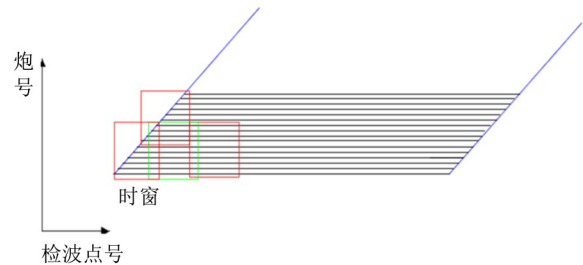


图9 数据体 $d(t, x, y)$ 组合方式和时窗选择示意图

Fig. 9 Seismic data $d(t, x, y)$ combination diagram and time window selection diagram

实际处理中,频率切片阈值和相邻炮阈值的选取极为关键,太小的阈值容易损伤一次反射,太大的值噪音衰减不彻底,本次处理对阈值进行了详细的扫描,最终根据噪音去除效果选择频率切片阈值1.1,相邻炮阈值为1.2。同时,为进一步改善去噪效果,对提取的绕射多次模型再次进行了大值相干信号提取,然后再从原始数据中将噪音减掉,提高了该方法的保幅性。图7c、图7d和图8c、图8d分别是绕射多次波去除前后单炮和叠加剖面对比,可见,F-X预测滤波处理后,有效衰减了深部残留多次波。图10为最终组合法多次波压制前后局部放大显示,可见,叠加剖面复杂多次波得到有效去除,深部有效反射信号得到了突出。

2.3 基于模型的复杂绕射波衰减

崎岖不平的海底存在众多的绕射点,地震波到达绕射点后,产生大量的绕射波,这些绕射波传播到二维地震测线后,在剖面上形成了大量的双曲线型绕射波场,传播时间在海底和海底全程多次波之间,能量较强,互相混叠,速度约为1600m/s,这类绕射波与崎岖海底的绕射多次波发育的时间范围有所不同,大部分能量集中在海底和海底全程多次波之间。目前,常规基于单一倾角、能量、频率属性的去噪方法,很难去除。本文采用了一种联合利用倾角、能量、信噪比属性

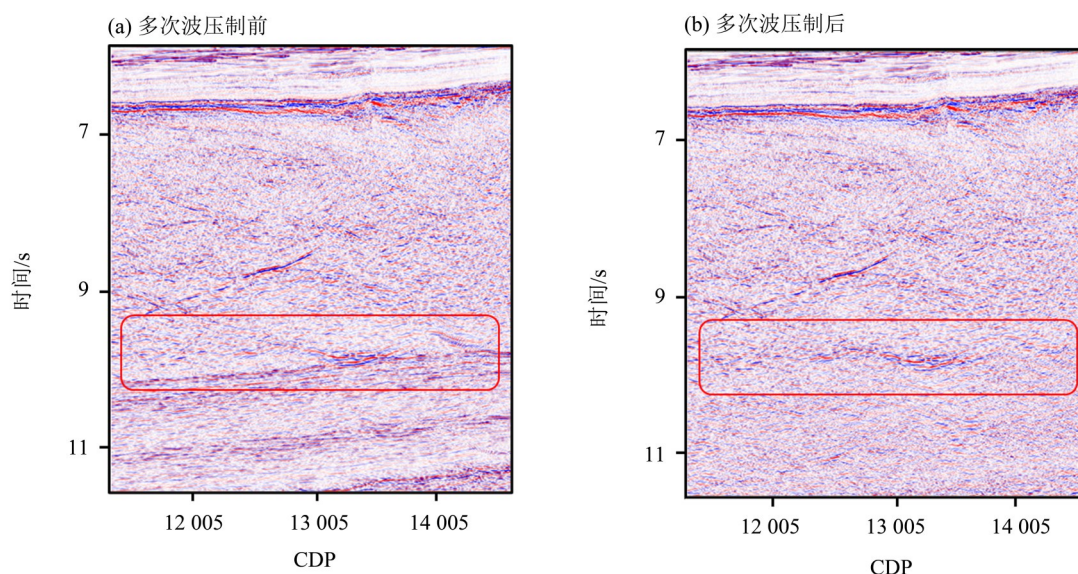


图 10 组合压制多次波前后叠加剖面对比

Fig. 10 Comparison of stack before and after combined suppression of multiples

提取复杂绕射波模型的方法, 首先从数据中提取高精度复杂绕射波模型, 然后再从数据中自适应减去复杂绕射波, 从而达到保幅衰减复杂绕射波的目的。该方法具体实现步骤为:

- 1) 根据复杂绕射波倾角范围, 给定倾角范围和空间道数确定扇形时窗;
- 2) 在扇形时窗内扫描计算每个倾角的非归一化相关能量, 具体计算方法见公式 (1)

$$S = \sum_{j=k-\frac{N}{2}}^{k+\frac{N}{2}} \left[\sum_{i=1}^M |f_{ij}| \right]^2, \quad (1)$$

其中 S 为相关能量; f_{ij} 为第 i 道的第 j 个样点值; M 为总道数; N 为以样点数 k 为中心的时窗长度。

- 3) 非归一化相关能量大于给定阈值的, 提取相应的复杂绕射波能量;
- 4) 将提取的复杂绕射波能量通过最小二乘自

适应从原始数据中减去。

倾角范围、空间道数和阈值是影响复杂绕射波提取的关键参数。倾角范围尽量按照要提取的复杂绕射波倾角范围给定, 保证在较小的倾角范围内提取复杂绕射波, 本次经过实际对复杂绕射波倾角范围的测量, 给定-15到15; 太大的空间道数计算效率低, 太小的空间道数不能准确提取噪音, 本次根据实际数据中信噪比较低的特点, 选择空间道数25。此外, 阈值控制提取复杂绕射波的能量大小, 需要根据所要提取的绕射波能量大小综合给定, 本次经过测试, 选定阈值0.005。

图11~12分别为复杂绕射波去除前后的共偏移距剖面 and 叠前时间偏移剖面对比, 可见, 基于模型的复杂绕射波衰减后, 复杂绕射波去除较为彻底, 消除了大量的构造假象。

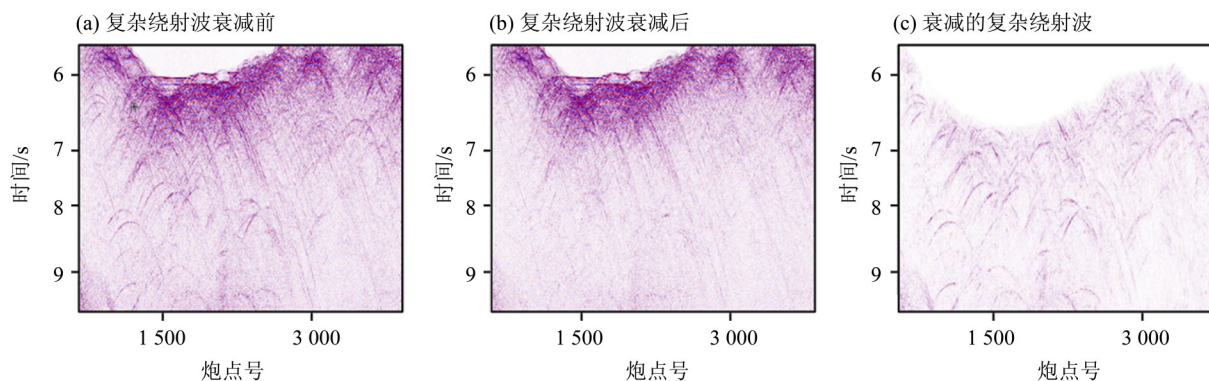


图 11 复杂绕射波衰减前后共偏移距剖面 (偏移距 3 825 m) 对比图

Fig. 11 Comparison of common offset profile (offset 3 825 m) before and after

2.4 处理效果分析

图 13 为新老叠前时间偏移成果 5~13 Hz 低频能量对比, 图 14 为新老叠前时间偏移成果频谱对比, 可见, 新成果低频能量更强, 因而整体上对深部反射地层刻画更清楚。图 15 为最终新老叠前时间偏移成果和信噪比对比, 可见, 新成果剖面

的波组关系清楚, 低频能量丰富, 信噪比较高 (从 5 提高到 10), 如图 15 箭头所示, 疑似莫霍面反射波能量得到明显增强, 连续性更好, 构造形态细节刻画清楚, 更有利于后续深部地质研究工作。

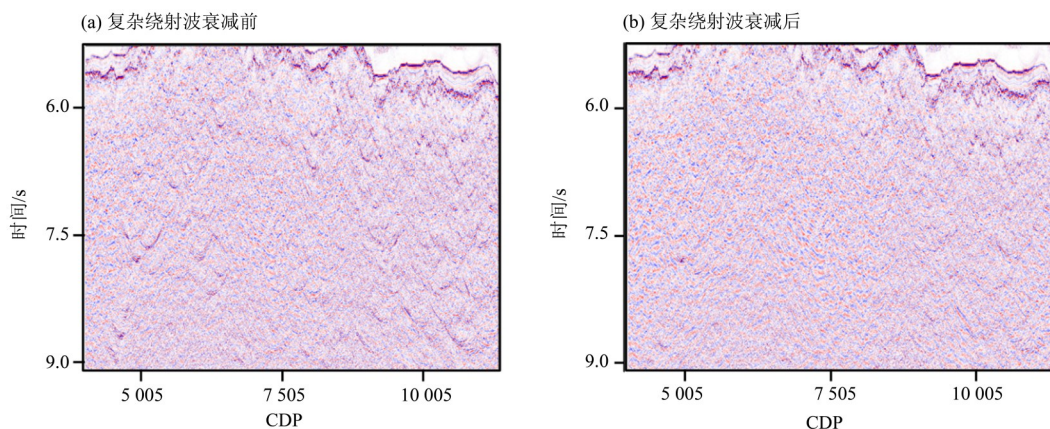


图 12 复杂绕射波衰减前后叠前时间偏移对比图

Fig. 12 Comparison of pre-stack time migration before and after the attenuation of complex diffracted waves

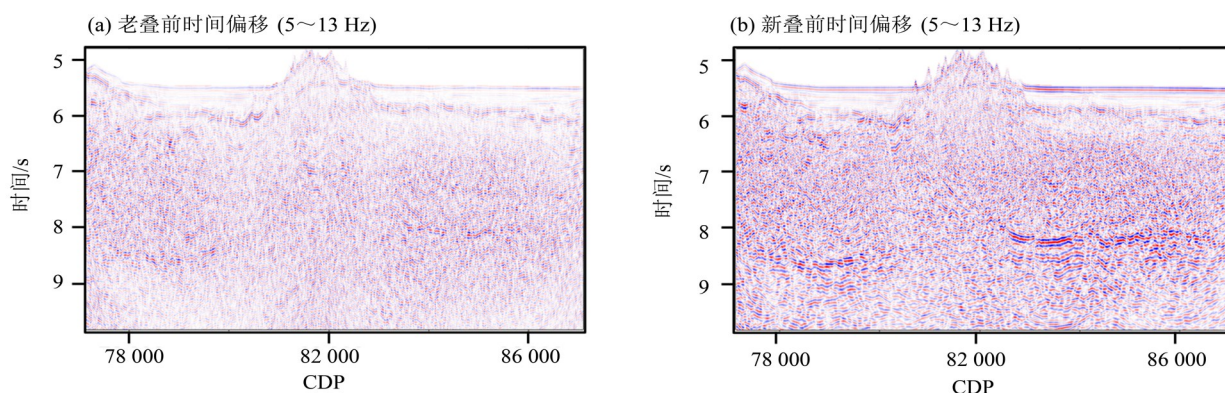


图 13 5~13 Hz 新老叠前时间偏移对比

Fig. 13 Comparison of previous and current pre-stack time migration (5~13 Hz)

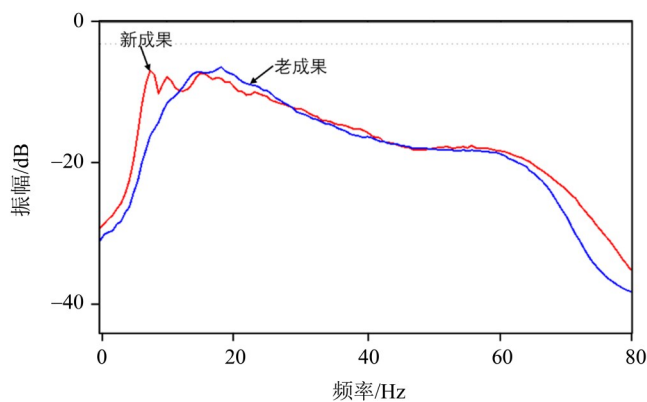


图 14 新老叠前时间偏移成果频谱对比

Fig. 14 Comparison of previous and current pre-stack time migration spectrum

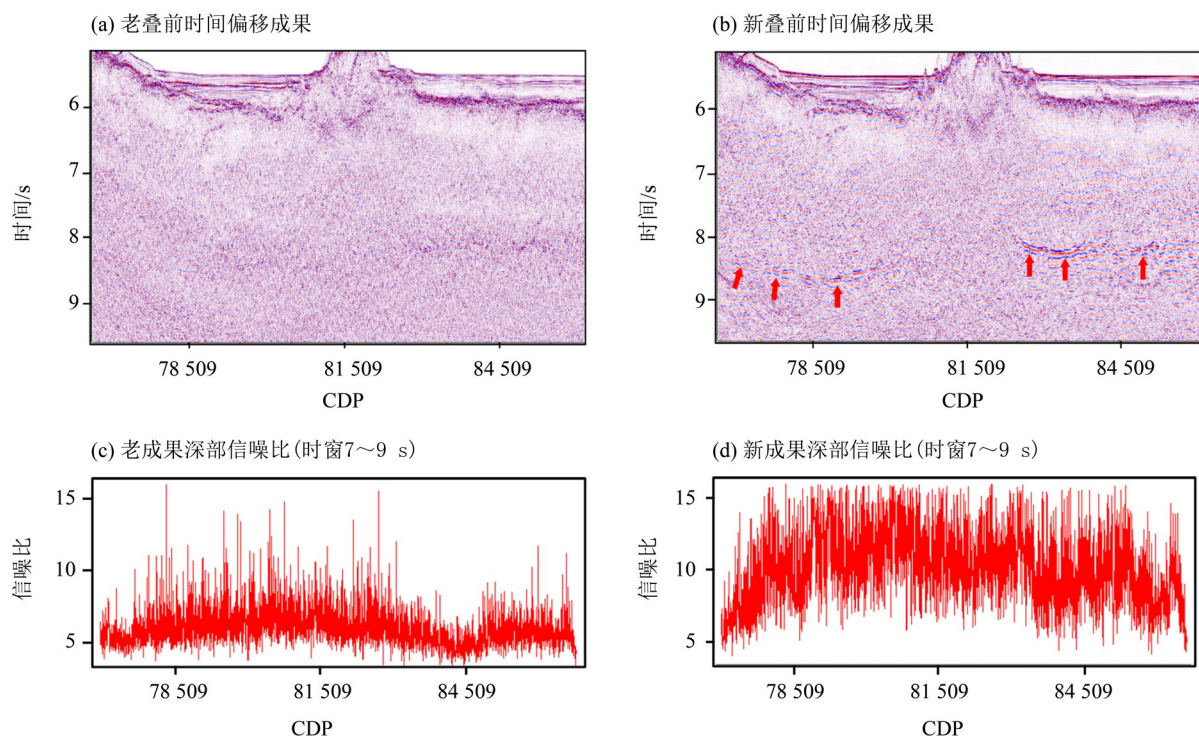


图 15 新老叠前时间偏移成果及信噪比对比

Fig. 15 Comparison of previous and current pre-stack time migration results and signal-to-noise ratio

3 结 语

有效恢复深部地层低频信号能量、压制复杂多次波及衰减复杂绕射波是改善南海深海盆区地震中深层成像的关键, 本文针对南海深海盆区地震资料特点, 采用3项关键处理技术, 增强了南海深部弱反射信号的低频能量, 提高了深部地层的信噪比, 改善了深部地层的成像质量, 取得了较好的应用效果, 结论如下:

1) 自适应鬼波去除技术有效增强了深层地震数据低频信息的能量, 改善了中深层成像质量;

2) 组合法复杂多次波衰减思路, 对 SRME、Radon、F-X 预测滤波 3 种方法进行了合理组合, 较好去除了南海深海盆区复杂多次波;

3) 倾角、能量、信噪比 3 种地震属性联合应用提高了复杂绕射波模型的识别精度, 最终有效衰减了复杂绕射波。

参考文献:

- [1] 金庆焕. 深水油气是当今海洋油气勘探的主要热点[J]. 科学中国人, 2006, 15(11): 18-19.
- [2] 周蒂, 孙珍, 陈汉宗. 世界著名深水油气盆地的构造特征及对我国南海北部深水油气勘探的启示[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 561-572.
- [3] 邓盾, 裴健翔, 邓勇, 等. 南海深水盆地改善中深层地震成像关键技术研究[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(2): 702-708.
- [4] 陈金海, 王桂华, 徐新南. 海上地震虚反射探讨[J]. 海洋石油, 2000, 20(1): 22-27.
- [5] 王永强, 王华忠, 孙维蕾, 等. 基于编码解码思想的鬼波预测与压制方法[J]. 地球物理学报, 2021, 64(4): 1389-1400.
- [6] 刘玉萍, 李福元, 顾元, 等. 南海南部盆地老地震资料攻关处理关键技术分析[J]. 华南地震, 2020, 40(3): 124-136.
- [7] 李洪建, 韩立国, 巩向博, 等. 基于格林函数理论的波场预测和鬼波压制方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(3): 1113-1124.
- [8] JOVANOVIĆ D B, SUMNER R D, AKINS-EAST-ERLINKINS S L. Ghosting and marine signature deconvolution: A prerequisite for detailed seismic interpretation[J]. Geophysics, 1983, 48(11): 1468-1485.
- [9] FOKKEMA T, van den BERG P M. Seismic applications of acoustic reciprocity[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1993.

- [10] WEGLEIN A B, GASPAROTTO F A, CARVALHO P M, et al. An inverse-scattering series method for attenuating multiples in seismic reflection data [J]. *Geophysics*, 1997, 62(6): 1975-1989.
- [11] 李翔,胡天跃. 逆散射级数法去除自由表面多次波[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(6):1633-1640.
- [12] 王芳芳,李景叶,陈小宏. 基于逆散射级数法的鬼波压制方法[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(5): 1628-1636.
- [13] WANG P, PENG C. Premigration deghosting for marine towed streamer data using a bootstrap approach [C]// 82th Annual International Meeting Society of Exploration Geophysicists. Expanded Abstracts, 2012: 1-5.
- [14] WEGLEIN A B. Multiple attenuation: An overview of recent advances and the road ahead [J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(1): 40-44.
- [15] SENGBUSH R L. Seismic exploration methods [M]. Netherlands: Springer, 1983:13-30.
- [16] 吴战培. 炮点域动校正后FK滤波[J]. *石油地球物理勘探*, 1995, 30(3): 422-423.
- [17] HARGREAVES N, COOPER N, WHITING P. High-resolution Radon demultiple [C] //15th Geophysical Conference. ASEG Extended Abstracts, 2001: 1-4.
- [18] 刘喜武,刘洪,李幼铭. 高分辨率Radon变换方法及其在地震信号处理中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2004, 19(1): 8-15.
- [19] 胡天跃,王润秋. 地震资料处理中的聚束滤波方法[J]. *地球物理学报*, 2000, 43(1): 105-115.
- [20] LOEWENTHAL D, LU L, ROBERSON R, et al. The wave equation applied to migration and water bottom multiples [C]//44th Annual International Meeting Society of Exploration Geophysicists. Expanded Abstracts. 1974.
- [21] WIGGINS J W. Attenuation of complex water-bottom multiples by wave-equation-based prediction and subtraction [J]. *Geophysics*, 1988, 53 (12) : 1527-1539.
- [22] BERKHOUT A J, VERSCHUUR D J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, Part I: Theoretical considerations [J]. *Geophysics*, 1997, 62 (5): 1586-1595.
- [23] 杨金龙,朱立华. 逆散射级数层间多次波压制方法及其应用[J]. *石油物探*,2018(6):853-861.
- [24] RICKETT J. Successes and challenges in 3D interpolation and deghosting of single component marine-streamer data [C]// 84th Annual International Meeting Society of Exploration Geophysicists. Expanded Abstracts, 2014: 3599-3604.
- [25] RICKETT J. Slanted-streamer data-adaptive deghosting with local plane waves [C]//76th Meeting European Association of Geoscientists & Engineers. Extended Abstracts, 2014: 572-576.
- [26] VERSCHUUR D J, BERKHOUT A J, WAPENAAR C P A. Adaptive surface-related multiple elimination [J]. *Geophysics*, 1997, 57: 1166-1177.
- [27] GULUNAY N, PATTBERG D. Seismic crew interference and prestack random noise attenuation on 3D marine seismic data [C]// 63th Meeting European Association of Geoscientists & Engineers. Extended Abstracts, 2001: 1-4.
- [28] GULUNAY N, PATTBERG D. Seismic interference noise removal [C]//71th Annual International Meeting Society of Exploration Geophysicists. Expanded Abstracts,2001.

(责任编辑 张冰)