

赵玥, 徐秀刚, 张浩楠, 等. 辽东湾海域浅水多次波组合压制技术[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(6): 85-92.

ZHAO Yue, XU Xiugang, ZHANG Haonan, et al. On combined suppression of shallow water multiples in Liaodong Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(6): 85-92.

辽东湾海域浅水多次波组合压制技术

赵玥¹, 徐秀刚^{1,2*}, 张浩楠¹, 高文中³, 吴开龙³

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;

3 中国石油冀东油田勘探开发研究院, 唐山 063006)

摘要: 浅水地震勘探中, 由于水层较浅, 多次波普遍发育, 而且很难压制, 如何更好地压制浅水多次波成为了海洋地震资料处理的重要环节。目前来说, 依靠单一的多次波压制技术很难将浅水多次波压制彻底, 因此本文探索了一种组合压制浅水多次波的思路, 首先基于确定性水层多次波压制方法 (DWD) 将短周期多次波实现压制, 然后采用自由表面多次波压制技术 (SRME) 将近偏移距长周期多次波进行压制, 最后再采用高精度 Radon 变换, 将残留的中、远偏移距长周期多次波完成压制。通过辽东湾海域浅水实际资料的多次波压制效果可以看出, 组合压制技术实现了对于资料中发育的浅水多次波的良好压制, 陷波频率得到较好的恢复, 资料品质得到有效改善, 信噪比得到有效提高。

关键词: 浅水; 多次波组合压制; 确定性水层多次波压制; 自由表面多次波压制; 高精度 Radon 变换

中图分类号: P736; P738

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.060

0 引言

在海洋地震资料中, 多次波的存在会严重影响地震剖面的分辨率和信噪比, 给后续的速度分析、偏移成像带来困难, 因此有效压制多次波一直是地震资料勘探处理中的一项重要研究课题^[1]。近年来, 全球近海油气勘探的不断发展, 海上勘探在地震勘探中所占的比例日益增加, 海上地震勘探数据中的浅水多次波较难压制^[2], 这些多次波的存在会严重影响地震资料的成像品质及解释工作, 如何较好地压制浅水多次波成为了海洋地震资料处理的重要

环节^[3]。自 20 世纪以来, 国内外的研究人员针对如何压制多次波进行了深入研究。1982 年 RYU^[4] 利用 F-K 变换首次对多次波进行了滤波处理, 1986 年 HAMPSON^[5] 提出使用抛物线 Radon 变换衰减多次波; 1988 年 WIGGINS^[6] 提出了在已知水深的前提下, 基于波动方程的水层多次波预测算法——波场外推法实现对于多次波的压制。1992 年 FOSTER^[7] 发展了双曲 Radon 变换理论, 提高压制多次波的效果; 1992 年 VERSCHUUR 等^[8] 首次提出了 SRME 自由表面多次波衰减思路, 在不需要先验信息的前提下, 实现对于多次波的压制, 该技术后来被广泛应用。由于每种方法各有其适用范围和优缺点, 不少学者提出采用多种方法组合的方式来压制多次波, 发挥各种方法的优势, 由此来提高成像质量, 适应更复杂的地质构造。ZHOU 和 GREENHALGH^[9] 在 1996 年首先提出了可以将预测相减的方法与抛物 Radon 变换相结合, 为综合压制多次波提供了新思路。2011 年黄兆林^[10] 结合三维 SRME 与高分辨率 Radon 变换开展了深水多次波压制研究。2013 年赵昌垒等^[11] 将 SRME 方法、线性 Radon 域预测反褶积和高精度 Radon 变换相

收稿日期: 2022-03-02

资助项目: 中国石油天然气股份有限公司冀东油田分公司课题“留守营凸起二维地震资料精细成像处理”(JDYT2019JS157); 科技部国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(2021YFE0108800); 海洋石油勘探国家工程实验室开放基金(CCL2020RCPS0419RQN)

作者简介: 赵玥(1996—), 女, 在读硕士, 主要从事多次波分离与成像方面的研究工作。E-mail: zhaoyuezy@163.com

* 通讯作者: 徐秀刚(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事多次波压制与成像、共聚焦点成像、波动方程偏移成像方面的研究工作。E-mail: xxg@ouc.edu.cn

结合对深海资料多次波进行了压制。2014年刘伊克等^[12]提出了多区域、多尺度的多次波组合压制技术,实现了对于南海深水多次波的压制。2020年颜中辉^[13]对东海多次波的压制采用使用DWD方法衰减,三维GSMP二维化及PRIMAL和高精度Radon变化的组合方法,较好地解决了东海多次波问题。

从国内外的发展现状可以看到,目前组合压制技术已在深水多次波中有了成熟应用,但是浅水多次波组合压制技术研究相对较少^[14]。因此,本文针对浅水水域的多次波,开展了组合压制技术的研究,采用DWD方法+SRME方法+高精度Radon变换的多次波组合压制技术,发挥不同压制方法的优势,最终实现对于浅水多次波的良好压制。首先,采用DWD技术实现对于短周期多次波压制,该方法虽然与以往采用的 τ - p 反褶积方法采用相同的方法计算多次波周期,但有效避免了 τ - p 反褶积方法给有效信号带来的损伤,具有更好的保幅性;然后采用SRME方法对近偏移距长周期和自由表面有关的多次波实现衰减,该方法在不需要先验信息的前提下可实现对于多次波的良好压制;再采用高精度Radon变换实现对中远偏移距的多次波的压制,该方法是基于有效波速度与多次波速度的差异在Radon域实现对其压制,通过3种方法联合,最终实现对于浅水海域多次波的良好压制。

1 组合压制多次波技术的基本原理

1.1 确定性水层多次波压制(DWD)技术

DWD方法是一种预测相减的多次波压制方法。该方法的基本原理是:首先应用近道自相关拾取海底反射时间,对地震数据进行 τ - p 正变换;然后在 τ - p 域计算海底多次波周期,将数据整体下移一个水层反射时间,此时有效波变成了一阶多次波,一阶多次波变成了二阶多次波,将时移后的记录与反射系数相乘获得预测的多次波模型;最后, τ - p 反变换后得到海底多次波模型,在时间域与含有多次波记录进行自适应相减,完成对于短周期多次波的压制。整个压制过程如图1所示。该方法需要水速、水深等信息,且假设是一维层状介质。而本文研究区域是近岸浅水区,其海底满足近似层状介质假设。

该方法实现对于水层多次波预测需要较为精

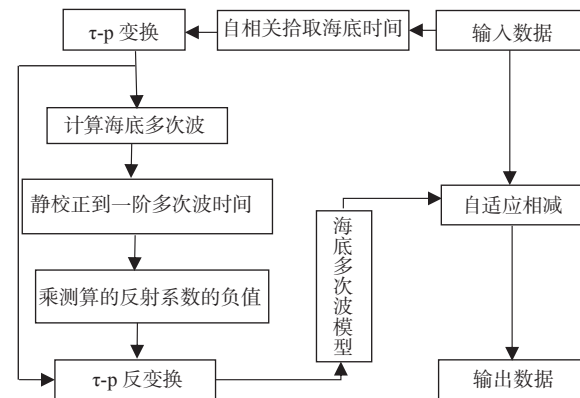


图1 DWD方法压制多次波原理

Fig.1 Principle of DWD method to suppress multiples

确的海底反射时间,而水层多次波在 τ - p 域的每个射线参数 p 上是周期性的,如图2。

多次波周期与 p 值的关系可以用公式定义。

$$T_s = T_w \times \frac{\sqrt{(D_{\text{ref}}^2 - p^2 V_w^2)}}{D_{\text{ref}}} \quad (1)$$

式中: T_s 为多次波周期,ms;

T_w 为水底双程时间,ms;

V_w 为水速,m/s;

p 为线性动校正量,s;

D_{ref} 为参考偏移距,m。

根据上式,可以得到 τ - P 域不同偏移距处的海底反射时间。

DWD与以常规的 τ - p 反褶积方法采用相同的思路计算多次波周期,但DWD是预测相减的思路压制多次波,可以有效避免 τ - p 反褶积方法给有效信号带来的损伤,具有更好的保幅性。

1.2 自由表面多次波压制(SRME)技术

自由表面多次波压制(SRME)技术是基于波动方程理论实现长周期多次波的压制,该方法是基于数据驱动的,不需要先验信息做约束,其实现包括多次波模型的建立和自适应相减2个步骤,首先获得预测多次波模型,然后再将预测的多次波模型与原始地震数据进行自适应匹配相减,最终得到多次波压制后的地震数据。其实现原理如下:

根据波动理论,消除表层多次波的迭代公式可以表示为^[15]:

$$P_0^{(n+1)}(z_0) = P(z_0) - p_0^{(n)}(z_0)A^{(n+1)}(z_0)P(z_0) \quad (2)$$

式中: $P(z_0)$ 为含有多次波的地震记录;

$P_0^{(n)}(z_0)$ 为 n 次迭代后含自由表面多次波的

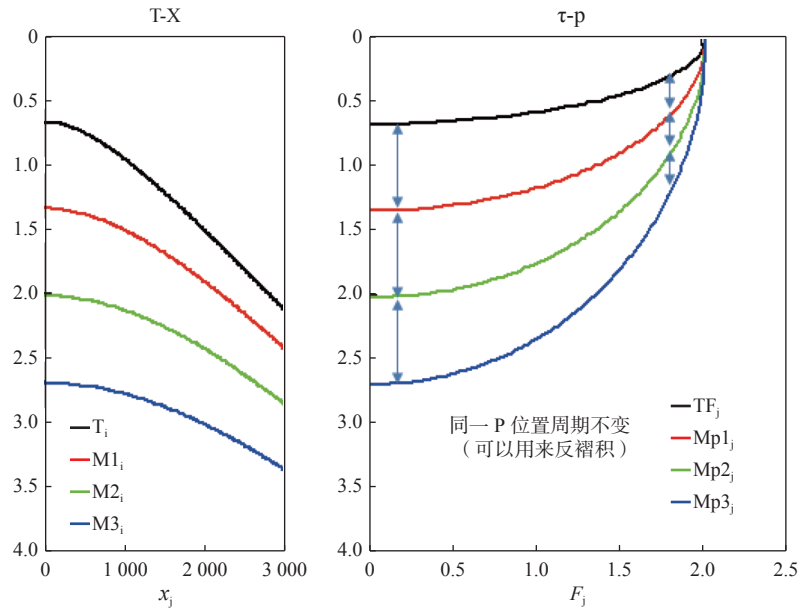


图 2 多次波在 τ - p 域的周期性示意图

Fig.2 The periodicity of multiples in τ - p domain

记录;

$A^{(n+1)}(z_0)$ 为地下算子;

$P_0^{(n+1)}(z_0)$ 为做 $n+1$ 次迭代后的含自由表面多次波的记录。

对于上式求解, 主要是在频率域通过迭代求解实现的, 具体步骤包括:

(1) 频域中预测未进行标定的表层多次波

$$M^{(n+1)} = P_0^{(n)} P \quad (3)$$

式中: $M^{(n+1)}$ 为 $n+1$ 次迭代后预测的自由表面多次波。

(2) 对初始预测出的的多次波做傅里叶逆变换得到时间域的多次波

$$m^{(n+1)}(t, x_r, x_s) = FT^{-1} \{M^{n+1}\} \quad (4)$$

(3) 时间域中利用最小二乘准则估计滤波算子 $a(t)$

$$E = \sum_{t, x_r, x_s} [P(t, x_r, x_s) - a^{(n+1)}(t) m(t, x_r, x_s)]^2 \quad (5)$$

式中: i 为炮数;

*代表褶积;

$a(t)$ 为子波反褶积算子。

(4) 将求得的滤波算子 $a(t)$ 带回到迭代公式中完成多次波的一次迭代压制过程; 如有必要再进行下一次迭代。

1.3 高精度 Radon 变换

Radon 滤波技术是一种作用于地震道集的压制

多次波技术。与利用多次波与一次波的动校时差, 再经叠加来衰减多次波的方法相比, Radon 滤波技术可以输出叠前道集、提供后续处理, 因此是一种比较受欢迎的压制多次波方法。

高精度抛物线 Radon 变换方法在 Radon 变换域寻求反射轴的稀疏表示, 在 Radon 参数和截断时间 2 方面 Radon 变换结果都被稀疏性约束, 分辨在远道处的反射同相轴。高精度抛物线 Radon 变换算子的逆不再是 Zoepritz 结构, 而是 Hermit 矩阵。

定义抛物线 Radon 反变换^[16]:

$$d(t, x_j) = \sum_{k=1}^M m(\tau = t - q_k x_j^2, q_k) \quad j = 1, \dots, N \quad (6)$$

式中: $d(t, x_j)$ 为 CMP 道集中的地震道;

x_j 为第 j 道的偏移距;

$m(\tau, q_k)$ 为 Radon 变换结果;

q_k 为曲率参数;

τ 为截距时间。

高精度抛物线 Radon 变换 m 通过求解下述方程得到:

$$(R + W^H W)m = L^H d = m_{adj} \quad (7)$$

式中: 矩阵 W 为对角阵, 记为:

$$\{W\}_{l,m} = w_l \delta_{l,m}, \quad m = 1, \dots, M \quad (8)$$

可以看出式中的元素不再是固定不变, 而是与 m 有关。这将导致一个迭代过程, W 由上次迭代得到的 m 给出 (Cauchy 准则, 稀疏约束反演)。数据分辨矩阵 $R + Q = L^H L + W^H W$ 不再是 Zoepritz 矩阵,

而是 Hermit 矩阵, 其元素为:

$$\{R+Q\}_{l,m} = \sum_{k=1}^N e^{-i2\pi f(q_1-q_m)x_k^2 + w_l^2 \delta_{l,m}} \quad (9)$$

这个矩阵可以用 Cholesky 分解方法进行求逆, 进而求解方程(7)。

这种方法提高分辨率是通过W矩阵限制加权序数, 当 q_k 位于有反射区域时, 选择较小的权, 当 q_k 位于无反射区域时, 选择较大的权, 使 Radon 变换的结果限定为零, 从而提高变换的分辨率。为使求解式(7)更为准确和快速, 可以采用共轭梯度方法, 并通过利用 Zoepritz 矩阵R的特点, 构造循环矩阵, 将矩阵乘积转换为向量褶积, 利用 FFT 将向量褶积变为乘积, 从而减少计算量, 加快计算速度。

2 实际应用与效果分析

勘探工区位于秦皇岛市南部辽东湾海域, 西部离海岸最近距离 4.3 km, 东部离海岸最近 21.5 km, 距秦皇岛市 30 km, 水深范围为 10~28 m。由于水浅, 发育了大量多次波, 其中自由表面多次波为主要的多次波成分。在去多次波前进行了涌浪、侧面

干扰、线性干扰等噪音的去除, 噪声去除过程中注意不破坏多次波的传播特性。图 3 是该区域典型单炮记录及对应的频谱图和自相关的结果, 从自相关图上可以看到, 旁瓣能量较强, 该数据存在着大量的短周期多次波; 而从频谱分析图上可以看到, 由于该海域水深较浅, 发育有严重的鬼波和浅水多次波, 信号频谱中陷波问题显著。

对于工区实际资料, 采用本文的多次波组合压制技术, 实现对其去多次处理, 验证其处理浅水区域多次波的处理效果。

2.1 DWD 压制效果

从确定性水层多次波压制前后单炮记录对比图可以看出(图 4), 能量较强的浅水多次波得到了明显压制, 有效波组得到突出。

对比压制多次波前后的速度谱可以看到, 压制多次波后浅层有效波的速度谱能量团聚性更好, 速度谱拾取精度更高(图 5)。经过确定性水层多次波压制后, 浅水短周期多次波得到了较好的压制, 剖面特征更加明显, 资料分辨率提高。

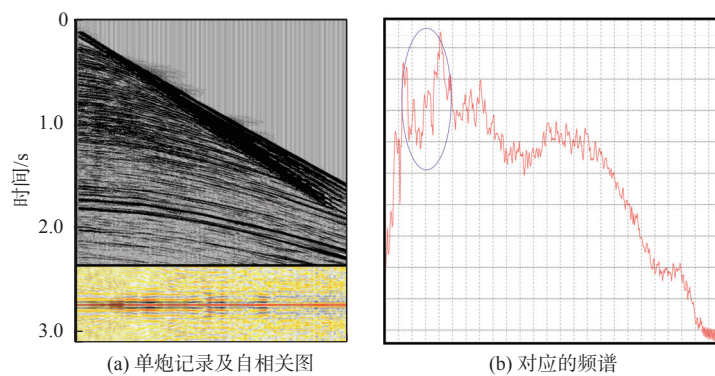


图 3 典型单炮记录、自相关图以及频谱图

Fig.3 Typical single shot record, autocorrelation and spectrum

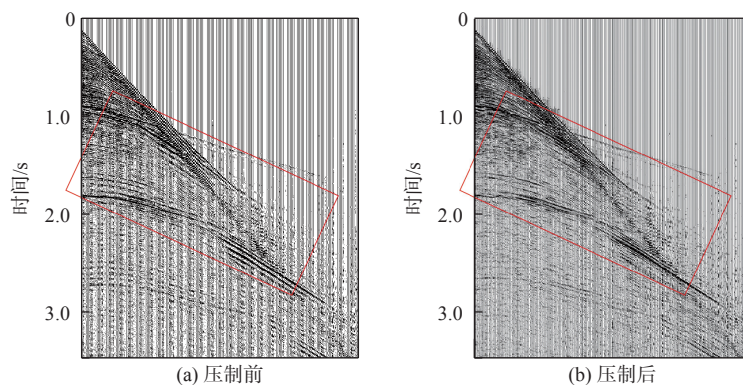


图 4 确定性水层多次波压制 (DWD) 前后单炮记录对比

Fig.4 Comparison of shot gather before and after DWD suppressing multiples

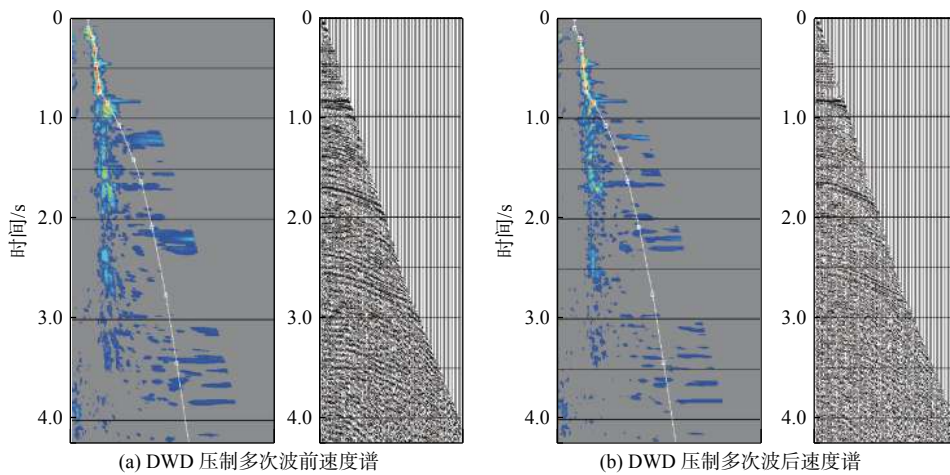


图 5 DWD 压制多次波前后的速度谱

Fig.5 Velocity spectrum before and after DWD suppressing multiples

2.2 SRME 压制效果

在 DWD 之后, 基于 SRME 技术对于资料进一步实现了多次波压制。从自由表面多次波压制前

后单炮记录对比图(图 6)可以看到, 近偏移距处的长周期自由表面多次波得到了较好的压制, 资料信噪比得到了提升。对应压制多次波前后速度谱的对比(图 7)表明, 速度谱上 SRME 压制多次波后表

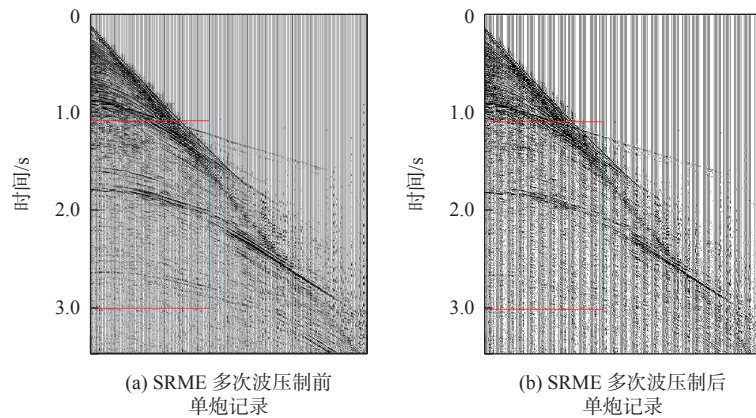


图 6 自由表面多次波压制前后单炮记录对比

Fig.6 Comparison of shot record before and after SRME suppressing multiples

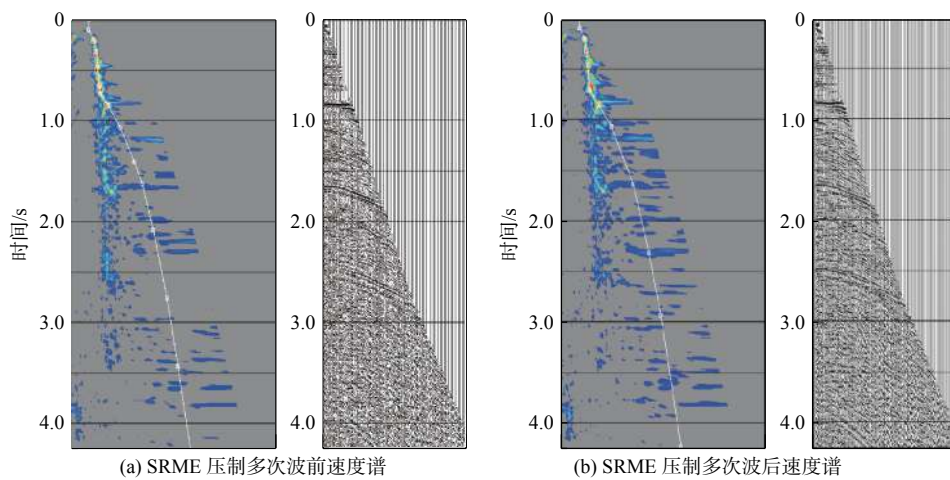


图 7 SRME 压制多次波前后速度谱对比

Fig.7 Comparison of velocity spectra before and after SRME suppressing multiples

征多次波的串珠状能量团得到有效衰减,有效波能量团更加聚焦。可见,基于SRME技术,很好地实现了对于记录中近偏移距长周期多次波的压制。

2.3 高精度 Radon 变换压制效果

经过前面两步处理后可以看到,炮集在中远偏移距上仍存在残留多次波,继续采用高精度 Radon 变换技术进一步压制残留的多次波。对比 Radon 变换压制多次波前后单炮记录可以看到, Radon 变换较好的实现了对于中远偏移距残留多次波的压制,在保证有效信号的同时信噪比也得到了提高(图8)。

图9为 Radon 变换压制多次波前后的速度谱对比图。从图中可以看到, Radon 变换压制多次波后多次波串珠状能量团消失,有效波能量团更加聚焦,速度分析精度进一步提高。最终,基于 Radon 变换技术实现了对于中远偏移距残留全程多次波

的良好压制。

2.4 多次波综合压制效果分析

图10为实际资料某一测线组合压制方法先后压制多次波的叠加剖面图和自相关图的效果对比。从图10a和10b的对比可以看到, DWD 技术主要实现了对于海水层相关的短周期多次波的压制,从自相关结果可以看到,自相关的旁瓣得到了很好的压制,资料分辨率得到有效改善。SRME 技术主要是对近道的长周期多次波实现了有效压制,如基岩下的长周期多次波得到了有效压制(图10c,蓝色方框),而 Radon 变换技术则是对长周期中、远偏移距残留多次波做进一步压制,蓝色框内的残留多次波得到了进一步的压制(图10d)。从图10b-d 自相关图上可以看到,主瓣波形压制过程中一直没有发生变化,说明整个压制多次波过程很好的保持了子波一致性,确保了对于有效信号的相对保幅处理。

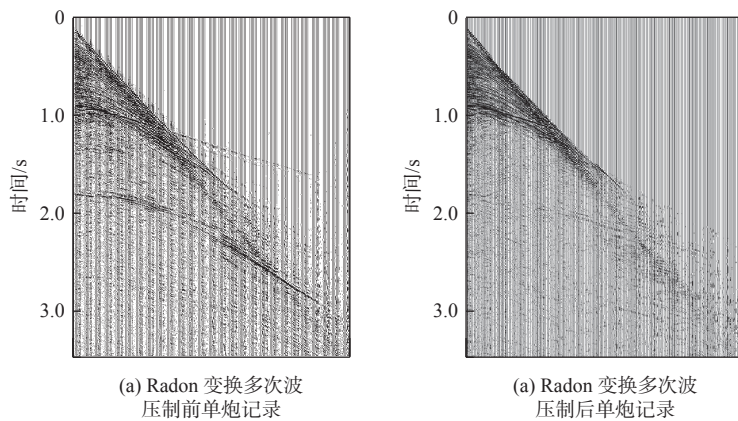


图8 Radon 变换压制多次波前后的单炮记录对比

Fig.8 Comparison of shot gather before and after multiples suppression by Radon transform

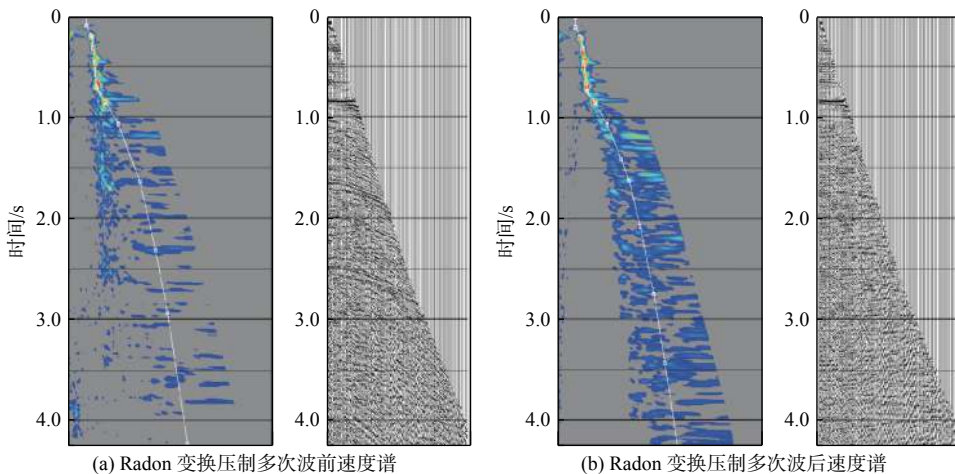


图9 Radon 变换压制多次波前后速度谱对比

Fig.9 Comparison of velocity spectra before and after multiples suppression by Radon transform

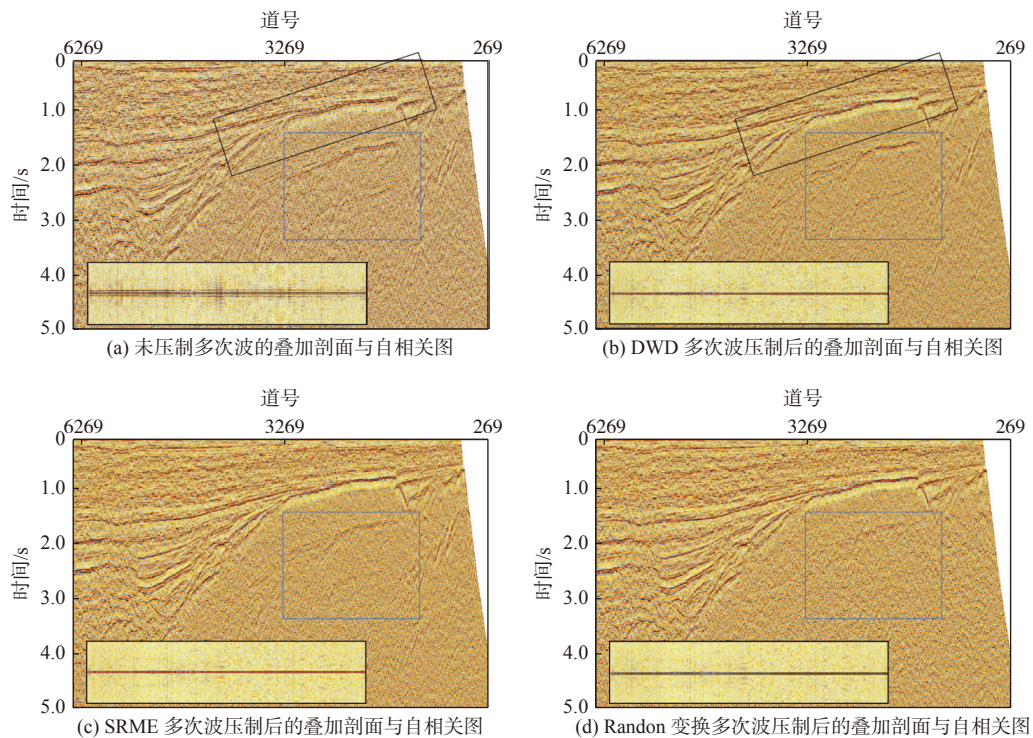


图 10 实际资料组合压制多次波前后的叠加剖面 and 自相关图

Fig.10 Real data stack section and autocorrelation before and after multiples suppression

从图 10a、10d 叠加剖面的对比图可以看到, 组合压制多次波的方法很好地实现了对于浅水发育的各种多次波的压制。

3 结论

本文基于 DWD+SRME+高精度 Radon 变换的组合去多次技术, 实现了对于辽东湾海域浅水多次波的良好压制, 取得了如下几点认识:

(1) DWD 技术对于该海域具有很好的适应性, 可以很好地实现对于水层相关的短周期多次波的压制, 压制后的单炮有效地层信号特征突出, 地层分辨率得到了提高, 速度谱的能量团聚焦性更好, 速度拾取精度更高。

(2) 基于数据驱动的 SRME 技术可以实现对于近道长周期多次波的良好压制; 而高精度 Radon 变换, 可以实现对于中、远偏移距长周期残留多次波的进一步压制, 两者联合最终实现了对于长周期多次波的良好压制。

(3) 实际资料的处理表明, 组合多次波技术能够很好地实现对于浅水发育多次波的压制, 压制后的陷波频率得到了有效提高, 资料频带得到了展宽, 资料品质得到了有效改善, 而且组合去多次方法相对于反褶积方法, 减少了对于有效信号的损伤, 结

果的保幅性更好。

参考文献:

- [1] KELAMIS P G, MITCHELL A R. Slant-stack processing[J]. *First Break*, 2014, 7(2): 43-54.
- [2] 刘俊, 吴淑玉, 高金耀, 等. 南黄海中部浅水区多次波衰减技术及其效果分析[J]. *物探与化探*, 2016, 40(3): 568-577.
- [3] 彭海龙. 基于斜缆数据的多次波消除方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- [4] RYU J V. Decomposition (DECOM) approach applied to wave-field analysis with seismic reflection records[J]. *Geophysics*, 1982, 47(6): 869-883.
- [5] HAMPSON D. Inverse velocity stacking for multiple elimination[C]. 56th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1986, 422-424.
- [6] WIGGINS J W. Attenuation of complex water-bottom multiples by wave-equation-based prediction and subtraction[J]. *Geophysics*, 1988, 53(12): 1527-1539.
- [7] FOSTER D J, MOSHER C C. Suppression of multiple reflections using the Radon transform[J]. *Geophysics*, 1992, 57(3): 386-395.
- [8] VERSCHUUR D J, BERKHOUT A J, WAPENAAR C P A. Adaptive surface-related multiple elimination[J]. *Geophysics*, 1992, 57(9): 1166-1177.
- [9] ZHOU B, GREENHALGH S. Multiple suppression by 2D filtering in the parabolic τ -p domain: a wave-equation-based method[J]. *Geophys Prospect*, 1996, 44(3): 375-401.
- [10] 黄兆林. SRME与Radon滤波方法组合衰减深水多次波[J]. *工程地球物理学报*, 2011, 8(6): 659-665.

- [11] 赵昌垒, 叶月明, 姚根顺, 等. 线性拉东域预测反褶积在海洋多次波去除中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(2): 1026-1032.
- [12] 刘伊克, 朱伟林, 米立军, 等. 南海北部陆坡区多次波发育特征及压制策略分析[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(10): 3354-3362.
- [13] 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.
- [14] 彭思凯, 李志娜, 李振春. 地震资料多次波压制方法研究进展及展望[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(5): 2069-2081.
- [15] VERSCHUUR D J, BERKHOUT A J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, Part II: Practical aspects and examples[J]. *Geophysics*, 1997, 62(5): 1596-1611.
- [16] 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.

On combined suppression of shallow water multiples in Liaodong Bay

ZHAO Yue¹, XU Xiugang^{1,2*}, ZHANG Haonan¹, GAO Wenzhong³, WU Kailong³

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 3 PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan 063006, China)

Abstract: In shallow water seismic exploration, multiple waves are generally developed and difficult to suppress as water is shallow. How to better suppress shallow water multiples has been an important part of marine seismic data processing. At present, it is difficult to completely suppress shallow water multiples by relying on a single multiple suppression technology. Therefore, a combination suppression technology of shallow water multiples was explored. First, deterministic water-layer demultiple (DWD) was used to suppress short-period multiples, and then the Surface-Related Multiple Elimination (SRME) was used to suppress the long-period multiples with a short offset distance. Finally, high-resolution Radon transform was used to suppress the residual medium and long offset long-period multiples. It can be seen from the multiple suppression effect of real shallow water data in the Liaodong Bay, the combined suppression technology achieved a good suppression of shallow water multiples as shown in the data reported. The notch frequency was better recovered, the data quality was effectively improved, and the signal-noise ratio was effectively improved.

Key words: shallow water; combination suppression of multiples; deterministic water-layer demultiple; surface-related multiple elimination; high-resolution Radon transform