

东海陆架多次波特点及去除策略

王惠东^{1,2,3}, 潘 军^{2,3,4*}, 颜中辉^{2,3,4}, 刘 鸿^{2,3,4}, 杨佳佳^{2,3,4}

(1 中国石油大学(华东), 青岛 266580;

2 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071;

3 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

4 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071)

摘 要:在东海陆架地区的地震资料中存在着多种类型的多次波,使得地震资料难以真实地反映地下地质信息,必须在地震资料处理过程中加以去除。根据多次波的不同特点,采用了 3 种技术方法组合去除的策略:采用 SWD 技术去除东海陆架普遍发育的与海底相关的短周期多次波;SRME 技术对强波阻抗界面产生的近道多次波压制效果明显;抛物线 Radon 变换可以较好地解决中远偏移距的长周期多次波。通过对东海陆架大量多道地震资料的处理,采取 3 种技术方法的优化组合基本上都可以取得较好的处理效果。

关键词:东海陆架;多次波;SWD;SRME;抛物线 Radon

中图分类号: P631.443

文献标识码: A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2017.04011

我国东海大陆架面积广阔、水深较浅,多道地震数据中往往存在较严重的多次波干扰。多次波的存在严重降低了地震剖面的信噪比和分辨率,而且多次波去除效果会对地震剖面的最终结果产生直接的影响,使得地震资料不能真实地反映地下地质信息,因此,去除多次波是地震资料处理的重要任务之一。

目前,多次波去除方法主要包括基于运动特征的滤波方法和基于波动理论的预测相减方法^[1,2],其中滤波法主要包括预测反褶积^[3,4]、F—K 滤波^[5]、Radon 变换^[6-8]、聚束滤波^[9]等;波动理论法包括波场延拓^[10]、反馈迭代^[11]、逆散射级数^[12]以及自由表面相关多次波衰减法 SRME^[13-16]。上

述方法都有自己的特点,但也存在一定的局限性。目前没有一种方法能够独立完成对所有类型多次波的去除,因此,需要根据实际资料的需要针对不同类型的多次波运用不同的方法来达到最好的去除效果。

针对东海陆架地区不同类型的多次波,本文采用 SWD(Shallow Water Demultiple)、SRME 和抛物线 Radon 变换相组合的方法进行压制。通过这 3 种方法的联合应用,地震资料中的多次波得到了很好的压制,资料的信噪比和分辨率显著提高。

1 东海陆架多次波的特点

东海陆架地区海底平坦而宽阔,自西向东缓慢倾斜,平均坡度为 58"左右,大部分水深在 20~140 m。由于海底较平且海水深度较浅,海底的一阶多次波发育比较明显。图 1 为东海地区典型首道多次波的表现形态,图中的箭头所指为海底的一阶多次波,可以看到多次波紧跟有效波,且能

收稿日期:2016-12-30

基金项目:国家自然科学基金(41406071);中国地质调查项目(DD20160153)

作者简介:王惠东(1990—),男,在读硕士,主要从事地震资料处理工作。E-mail: wanghd_upc@163.com

* 通讯作者:潘 军(1983—),男,博士,高级工程师,主要从事海洋地震数据处理工作。E-mail: panjun811@163.com

量较强,并呈现出周期性特点,其周期与海底时间相一致。海水的二阶多次波能量衰减较快,在道集中表现并不明显。这种类型的多次波在大部分东海陆架地区都很常见,是最为典型的一种多次波。

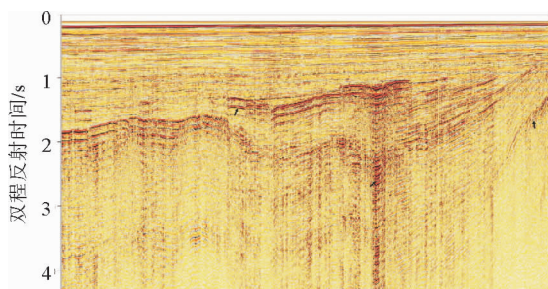


图 1 东海典型首道多次波的表现形态

Fig. 1 Small offset multiple in trace gather of the East China Sea

此外,东海陆架地区还发育有典型的近道多次波,如图 2 所示。这种近道多次波多是由于强波阻抗界面多次反射造成,能量衰减较慢,延续时间比较长,周期性很明显。该多次波与有效波的速度差异比较小,基本上没有明显的剩余时差。在频谱上,近道多次波的频带与有效波基本一致,两者很难区分开。

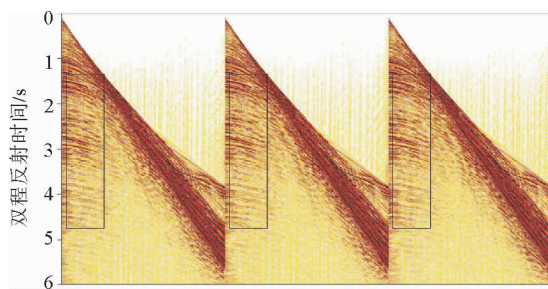


图 2 东海典型单炮多次波的表现形态

Fig. 2 Typical multiple in shot gather of the East China Sea

在叠加剖面上(图 3),东海陆架盆地多次波较为发育,严重干扰有效波的成像。其中基底的多次波多为长周期多次波,如图 3 中箭头所示。此外,在方框中,可以很清楚的看到多次波与有效波交叉混叠的现象,很难区分有效波与多次波,不利于对地下真实构造的研究。

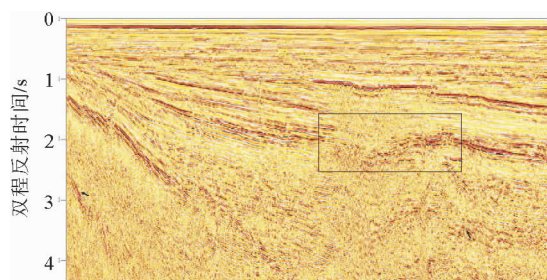


图 3 东海典型叠加剖面多次波的表现形态

Fig. 3 Typical multiple in stack profiles of the East China Sea

通过分析东海陆架盆地多次波的特点,可以发现以下规律:海水一阶多次波较为发育,在道集上具有周期性,且这种周期性与海水深度密切相关,但海水的二阶及以上多次波能量衰减较快,且并不明显;部分强波阻抗界面容易产生近道多次波,能量衰减较慢,延续时间比较长,对有效波干扰严重;叠加剖面上,基底多次波发育明显且多为长周期,在深部地区,多次波倾角增大特征明显,并有多次波与有效波交叉混叠现象。

2 东海多次波去除策略

根据东海多次波的特点,在处理中分别采用 SWD 去除技术、SRME 技术和 Radon 变换技术分别针对不同类型的多次波技术进行去除。

2.1 SWD 去除技术

SWD(Shallow Water Demultiple)技术主要是针对浅水多次波去除的一项技术。图 4 简单介绍了 SWD 去除多次波的基本思路。图 4a 假设在零偏移距条件下多次波在海水之间多次波震荡,有效波振幅为 1,有效波和多次波之间的周期为 T 。一阶多次波经过海面反射后相位反转,振幅为 1,这个振幅实际代表针对一阶多次波的初始值,实际上其振幅一般是小于有效波振幅。二阶多次波再经过海面反射后相位再反转,代表二阶多次波的振幅初始值仍旧为 1。

图 4b 为图 4a 延迟时间 T 乘以 -0.5 后的结果。图 4c 为图 4a 减去图 4b 的结果。图 4d 为图 4c 延迟时间 T 乘以 -0.5 后的结果。图 4e 为图 4b 和图 4d 相加的结果。可以看到,经过这种流

程的变换,一阶多次波可以较好地模拟出来,而二阶多次波能量相应减少,这样在自适应相减时将较确定的一阶多次波较好去除,而对于二、三阶多次波则倾向于去除较轻。这样综合考虑了多次波的去除和有效信号保护之间的平衡,对于实际处理效果有更高的自由度。

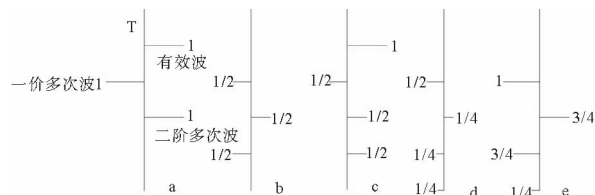


图 4 SWD 去除多次波的原理图解

Fig. 4 Flow chart of shallow water multiple prediction

以上假设是在零偏移距条件下,此时多次波和有效波之间的时差为 T ,但在非零偏移距条件下,在时空域(TX)有效波和多次波之间的时差不再为等时差。如图 5a 所示(图中 TX 域和 TAUP 域中的黑色箭头长度都是相同的),在 TX 域中,近偏移距时多次波满足周期变化的条件,但是在远偏移距,时差关系不再遵循等量变化但是将炮集数据从时空域通过线性 Radon 变换转换到 TAUP 域^[17],此时在任何 Radon 时差量处,多次波都遵循等时差变化。因此,在 TAUP 域中通过

静校延迟技术可以较好地解决浅水多次波预测问题,再通过自适应相减^[18]即可实现对多次波的有效压制。

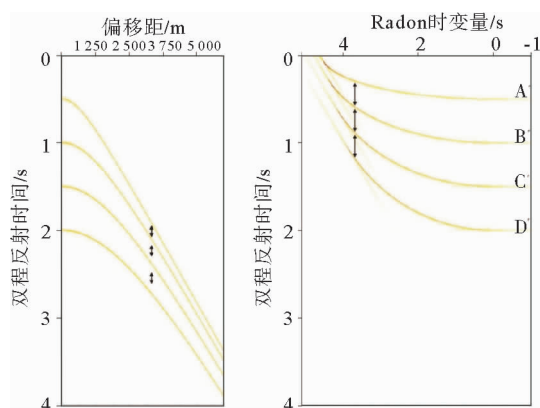


图 5 浅水多次波在 TX 域和 TAUP 域中的特点

Fig. 5 The characteristics of shallow water multiples in TX domain and TAUP domain

首道多次波经过 SWD 技术去除后,跟海底周期相关的多次波得到很好的压制(图 6)。最终获得的 SWD 去多次波前后叠加剖面如图 7 所示。可以看到,经过浅水去多次波处理,在海水中传播的多次波得到很大程度的压制,叠加剖面信噪比提高。受浅水多次波影响更为严重的浅层构造在多次波去除后能量更为集中,从剖面上也可以看出构造形态也更利于后期的层位追踪。

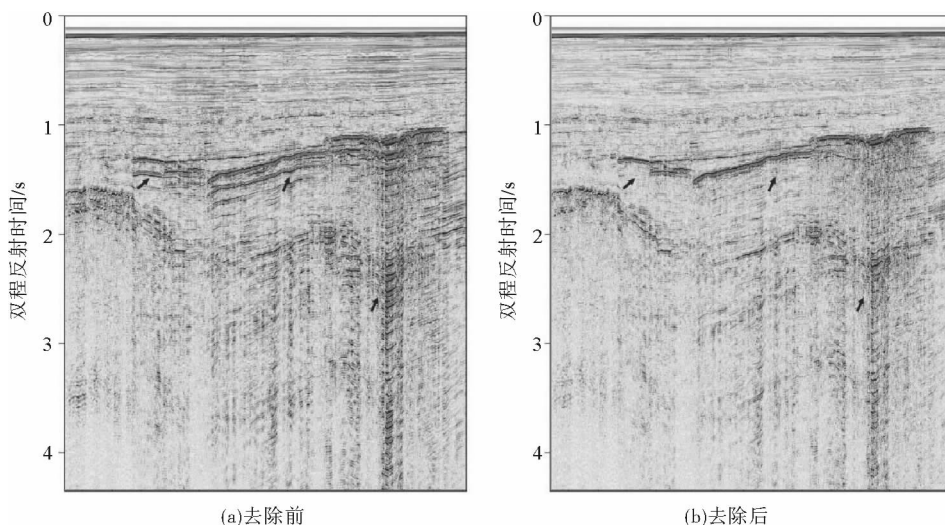


图 6 首道多次波经过 SWD 技术去除前后的对比

Fig. 6 Comparison of seismic profiles before and after multiple elimination in First trace gather using SWD

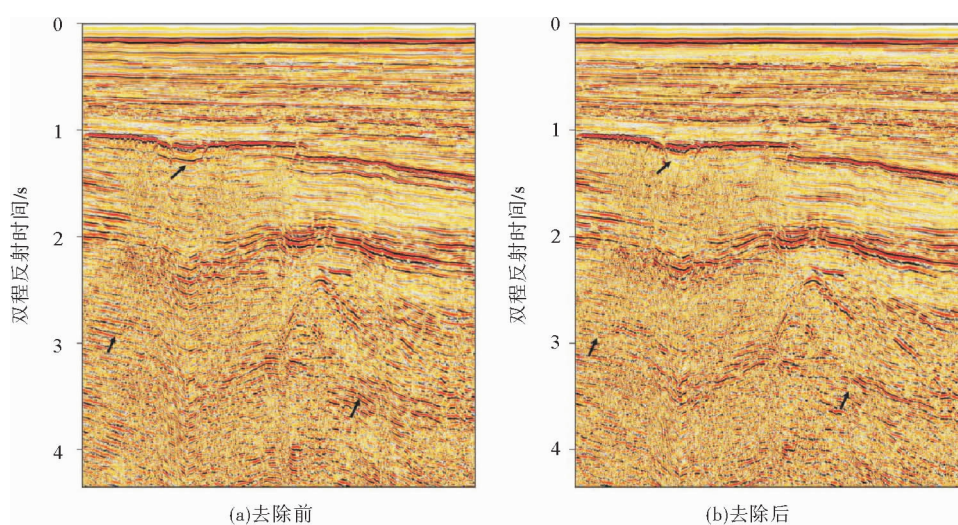


图 7 SWD 去除前后叠加剖面的对比

Fig. 7 Comparison of stack profiles before and after using SWD

SWD 技术主要适用于海水较浅且海底较平缓的地区,东海大陆架的大多数海区都符合这一条件,因此,这种技术在本区具有较好的应用性。

2.2 SRME 去除多次波技术

通过地震记录自褶积 1 次,可以得到一阶多次波的预测响应,自褶积 2 次,得到二阶多次波的预测响应;全部预测响应相加后得到不含地表相关多次波的数据,再通过原始数据与其自适应相减即可去除与自由界面相关的多次波,这就是 SRME 技术的基本原理^[19]。SRME 去除多次波不需要知道详细的地下界面信息,仅依靠数据驱动即可实现多次波的去除。

SRME 的具体实现过程主要分为 3 步,包括近偏移距插值,自由表面多次波预测和自适应相减。根据 SRME 的基本原理,偏移距应该从零开始,但是受实际野外采集条件的限制,最小偏移距都大于零,这需要通过数据插值的方法推算出近偏移距的数据。由于东海陆架地区横纵向在小区域内变化并不剧烈,因此,可以使用高精度 Radon 变换^[20,21]插值获得近偏移距数据。

由于东海陆架水深较浅,直达波和浅层折射波比较发育,干扰了中远偏移距的有效波。SRME 多次波预测以反射波为基础,直达波和浅层折射波的存在会造成错误的预测结果,即使通过 TAUP 域去除直达波和浅层折射波^[22]也很难

将其完全消除,因此,SRME 技术主要对近道多次波进行去除,中远偏移距的多次波可以通过 Radon 变换进一步消除。

自适应相减是 SRME 技术的关键步骤,对处理效果影响最大。主要包括算法选择(1D 滤波和 2D 滤波)、空间和时间滤波宽度、滤波域(炮域和道域)。自适应相减的核心问题是如何取舍处理效果,因为往往在多次波去除较好时有效波也会伤害较大,而有效波得以保留时则多次波又很难去除。因此这对处理人员的要求较高,需要在关键参数的选择上能够兼顾去除多次波和保留有效波。在东海陆架数据处理时偏向于保守处理,即采用道域的 1D 滤波,采用较大的空间和时间滤波参数,重点是去除近道多次波。

SRME 技术去除前后炮集的对比见图 8。图 8a 为经过 SWD 去除多次波的单炮,可以看到箭头所指的基底的多次波并没有消除,在道集上基底多次波具有比较明显的周期性,其时间大约为基底时间的 2 倍,但是其周期明显大于海底周期。经过 SRME 技术去除后的道集如图 8b 所示,近道多次波得到较好的压制,道集信噪比进一步提升,但是中远偏移距仍旧残留有多次波。在叠加剖面上(图 9),由于近道多次波的影响,基底多次波也可以成像,经过 SRME 技术去除后,基底多次波在叠加剖面上得以压制,构造形态更加清楚。

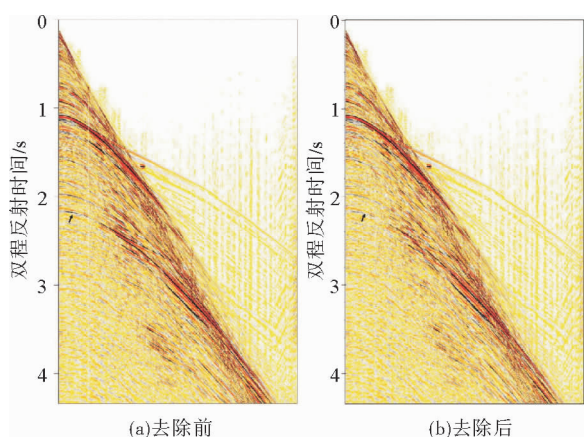


图 8 SRME 去除前后炮集的对比

Fig. 8 Comparison of multiple elimination in shot gather before and after using SRME

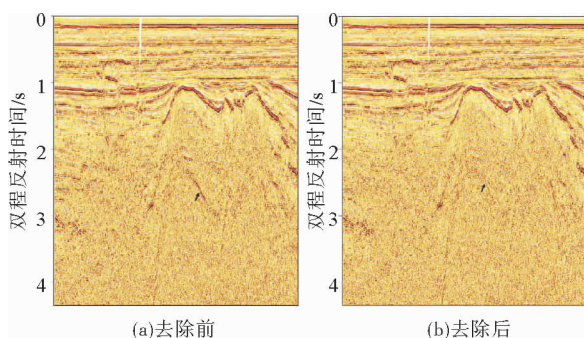


图 9 SRME 去除前后叠加剖面的对比

Fig. 9 Comparison of stack profiles before and after using SRME

2.3 抛物线 Radon 变换去除多次波技术

抛物线 Radon 变换(PRT)主要用于消除长周期的多次波^[23],当一次波经过动校正后被拉平,多次波还存在近似抛物线形态的剩余时差。图 10 简单说明了抛物线 Radon 变换的基本原理。当 CMP 道集做一次波的动校正后,一次波被拉平(图 10a 中的水平同相轴),而图 10a 中代表多次波的 A 和 B 还存在剩余时差。通过设计参考偏移距,最小时差(图 10a 中的①)和最大时差(图 10a 中的②),即可定义抛物线的扫描范围,通过沿时间轴和抛物线路径对 TX 域数据扫描叠加,结果如图 10b 所示。可以看到一次波由于被拉平,不存在剩余时差问题(即时差量为 0),而 A'(对应 A)和 B'(对应 B)明显具有剩余时差,经过切除再反变换后即可实现对多次波的压制。

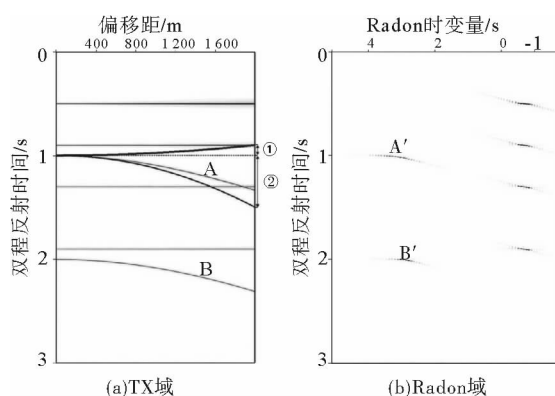


图 10 时空域映射到 Radon 域

Fig. 10 Transform from TX domain to Radon domain

经过 SWD 和 SRME 技术去除后的炮集仍旧存在长周期的多次波(图 11a),经过抛物线 Radon 变换后长周期多次波基本去除干净(图 11b),而有效波也得到了很好的保护。使用抛物线 Radon 变换去除噪音前后的叠加剖面如图 12 所示,可以看到经过长周期多次波的去除,有效波能量增强,叠加剖面的信噪比得到明显改善。

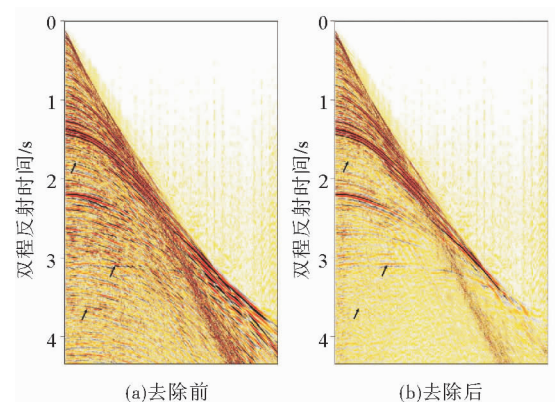


图 11 抛物线 Radon 变换去除前后炮集的对比

Fig. 11 The comparison of multiple elimination in shot gather before and after parabolic Radon transform

3 多次波处理效果分析

采取 3 种技术方法分步压制多次波的结果表明:SWD 技术可以较好地去除跟海底相关的短周期浅水多次波;SRME 技术对强波阻抗界面产生的近道多次波压制效果明显;抛物线 Radon 变换可以较好地解决中远偏移距的长周期多次波。虽

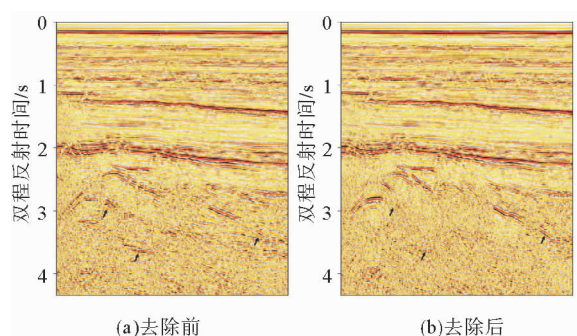


图 12 抛物线 Radon 变换去除前后叠加剖面的对比

Fig. 12 The comparison of stack profiles before and after parabolic Radon transform

然每一种方法都存在一定的局限性,不可能通过其中任何一种方法完全去除资料中的多次波,但是通过 3 种技术组合,基本可以达到压制多次波的目的。

图 13 是去除多次波前后速度谱的对比,去除前的速度谱受多次波的影响,有效波被湮没,很难得到可靠的速度信息,去除多次波后,多次波能量得到压制,有效波速度谱得到显现,正确可靠的速度对于后续的叠加、偏移处理至关重要。图 14 是多次波去除前后的叠加剖面,经过 3 种技术去除多次波后,叠加剖面的分辨率和信噪比得到大幅的提升,有效波波组特征合理、连续性得到改善,整体变化形态更加清晰,多次波与有效波交叉混叠的现象得到去除,能更真实的反映地下的地质信息。实际资料的处理结果表明,3 种技术组合可以获得较好的多次波去除效果。

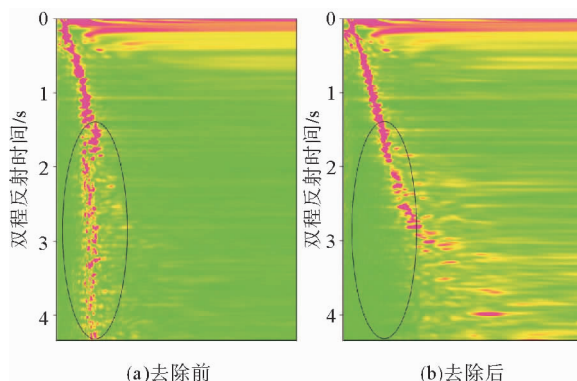


图 13 多次波去除前后速度谱的对比

Fig. 13 Comparison of velocity spectrum before and after multiple attenuation

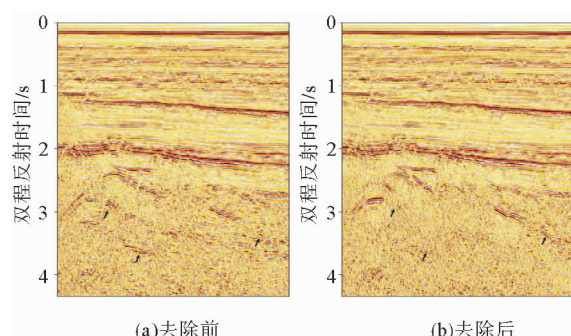


图 14 多次波去除前后叠加剖面的对比

Fig. 14 Comparison of stack profiles before and after multiple elimination

(a: original stack profile; b: with multiple eliminated)

4 结论

通过东海陆架地区多次波的分析发现,在工区浅水多次波、近道多次波和长周期多次波都比较发育,采用单一的去波方法并不能满足处理工作的需要,因此,我们采用了 3 种方法结合的去波策略:SWD 技术可以较好地去除跟海底相关的短周期浅水多次波;SRME 技术对强波阻挡界面产生的近道多次波压制效果明显;抛物线 Radon 变换可以较好地解决中远偏移距的长周期多次波。通过对东海陆架大量多道地震资料的处理,采取 3 种技术方法的优化组合基本都可以取得较好的处理效果。

致谢: 对参与东海多道地震采集的全体工作人员表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 黄兆林. SRME 与 Radon 滤波方法组合衰减深水多次波[J]. 工程地球物理报, 2011, 8(6): 659-665.
- [2] 贾连凯, 吴时国, 赵昌奎. 多次波压制技术在南海北部陆缘深水区的应用[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(2): 920-930.
- [3] 张军华, 缪彦舒, 郑旭刚, 等. 预测反褶积去多次波几个理论问题探讨[J]. 物探勘探计算技术, 2009, 31(1): 6-10.
- [4] 赵昌奎, 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.
- [5] 闫立志, 景新义, 李刚. F-K 滤波在噪音减去法中的作用[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(10): 28-32.

- [6] 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.
- [7] 石颖, 王维红. 基于波动方程预测和双曲 Radon 变换联合压制表面多次波[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 3115-3125.
- [8] 熊登, 赵伟, 张剑锋. 混合域高分辨率抛物 Radon 变换及在衰减多次波中的应用[J]. 地球物理学报, 2009, 52(4): 1068-1077.
- [9] 胡天跃, 王润秋, 温书亮. 聚束滤波法消除海上地震资料的多次波[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(1): 18-23.
- [10] 孙海龙, 王德利, 陈鑫等. 基于波场延拓的多次波压制技术及其改进[J]. 世界地质, 2015, 34(1): 226-231.
- [11] 石颖, 井洪亮, 李莹. 反馈迭代法压制表面多次波效果分析[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1493-1500.
- [12] 金德刚, 常旭, 刘伊克. 逆散射级数法预测层间多次波的算法改进及其策略[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1209-1217.
- [13] Verschuur D J, Berkhout A J. Adaptive surface-related multiple elimination [J]. Geophysics, 1992, 57(9): 1166-1177.
- [14] Verschuur D J, Berkhout A J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, Part II: Practical aspects and examples[J]. Geophysics, 1997, 62, 1596-1611.
- [15] 肖二莲, 陈瑜, 万欢, 等. SRME 多次波衰减方法在海洋地震资料中的应用[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 1057-1064.
- [16] 潘军, 栾锡武, 孙运宝, 等. SRME 技术在海洋浅水高分辨率地震勘探中的应用[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 429-434.
- [17] 李列, 谢玉洪, 李志娜, 等. 海上多次波压制与成像方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 446-453.
- [18] 李鹏, 刘伊克, 常旭, 等. 均衡拟多道匹配滤波法在波动方程法压制多次波中的应用[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1844-1853.
- [19] Verschuur D J. Seismic Multiple Removal Techniques: past, present and future (in Chinese)[M]// Chen H L, Zhang B Q, Liu J, et al. Trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010, 71-119.
- [20] Hampson D. Inverse velocity stacking for multiple elimination[J]. Journal of the Canadian society of exploration geophysicists, 1986, 22(1): 44-55.
- [21] Sacchi M D, Ulrych T J. High-resolution velocity gathers and offset space reconstruction. Geophysics[J], 1995, 60(4): 1169-1177.
- [22] 鲁娥, 李庆春. 混合 Radon 变换地震噪声压制的应用[J]. 物探与化探, 2012, 37(4): 706-710.
- [23] 谢俊法, 孙成禹, 韩文功. 迭代抛物 Radon 变换法分离一次波与多次波[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(1): 76-81.

CHARACTERISTICS OF THE MULTIPLES IN THE EAST CHINA SEA AND ELIMINATION METHOD

WANG Huidong^{1,2,3}, PAN Jun^{2,3,4*}, YAN Zhonghui^{2,3,4}, LIU Hong^{2,3,4}, YANG Jiajia^{2,3,4}

(1 China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2 Key laboratory of Marine Petroleum Resources & Environment Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China;

3 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China;

4 Function Laboratory for Marine Mineral Resource Geology and Exploration, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: Many types of multiples are observed in the seismic profiles from the East China Sea shelf area, which have brought up a lot of difficulties for geological interpretation. According to the different characteristics of multiples, three methods are proposed in this paper for multiple attenuation. The SWD approach is used to remove the short-period multiples of the sea bottom. The SRME technique is effective for suppressing the near-offset multiple of the strong wave impedance interface. The parabolic Radon transform can attenuate the long-period multiple of far-offset. In the processing of a large number of multi-channel seismic data of the East China Sea shelf, the optimal combination of the three techniques is recommended for better effect.

Key words: East China Sea shelf; multiples; SWD; SRME; parabolic Radon transform