

潮汕坳陷多次波组合压制技术研究

林秋金^{1,2}, 阎贫¹, 于宏³, 郑红波¹, 唐群署¹, 王彦林¹

1. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 湛江特普高科技有限公司, 广东 湛江 524000

摘要: 潮汕坳陷中生界发育, 是我国海上重要的油气勘探后备区。但该区多次波非常发育, 多次波识别和压制一直是该区地震资料处理的关键和难点。合理地选取有效的多次波压制方法是获得高品质地震剖面的关键所在。针对原始资料中多次波异常发育的情况, 文章分析了该区多种类型多次波的特点, 尝试了零偏移距截距时间-射线参数(τ - p)域预测反褶积、自由界面多次波衰减法(Surface-Related Multiple Elimination, SRME)和双曲线 Radon 变换, 对多次波进行组合压制, 克服了仅依靠一种手段难以压制多种类型多次波的局限。从资料处理效果看, τ - p 域预测反褶积方法对短周期的鸣震和微曲多次波的压制效果较好, SRME 有效地压制自由表面多次波, 且在近炮检距范围内压制多次波效果很好, 而双曲线 Radon 变换是衰减长周期的层间多次波和未被充分压制的自由表面多次波很好的选择。组合压制多次波后的剖面质量明显得到改善。

关键词: 潮汕坳陷; 预测反褶积; 自由界面多次波衰减法; 双曲线 Radon 变换

中图分类号: P733.23 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2012)01-0055-07

Multiples suppression using combination method in Chaoshan Depression of the South China Sea

LIN Qiu-jin^{1,2}, YAN Pin¹, YU Hong³, ZHENG Hong-bo¹, TANG Qun-shu¹, WANG Yan-lin¹

1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China; 2. Graduate University of CAS, Beijing 100049, China; 3. Deep Energy Technology Limited Company, Zhanjiang 524000, China

Abstract: The Chaoshan Depression, where the Mesozoic strata well developed, is an important mothball area for gas and oil exploration in the South China Sea. Identification and suppression of seismic multiples are especially difficult and are the keys to this area. In order to obtain high-quality seismic profiles, combining methods for multiples suppression is critical. According to the original seismic data with abnormal development and various multiples in two dimensions, This paper analyses the types and properties of the multiples, trying to suppress multiples using combination method with predictive deconvolution in τ - p domain, Surface Related Multiples Elimination (SRME) and Hyperbolic Radon transform. Short-period reverberation and peg-leg multiples are effectively attenuated by predictive deconvolution; SRME method is used for suppressing surface-related multiples well, especially in the near-offset range; and hyperbolic radon transform is a good choice to attenuate long-period and surface-related multiples that are not sufficiently suppressed. As we expected, the quality of seismic profile improves significantly after suppress multiples using combination method.

Key words: Chaoshan Depression; predictive deconvolution; Surface-Related Multiple Elimination; Hyperbolic Radon transform

收稿日期: 2010-07-08; 修订日期: 2010-09-03。卢冰编辑

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-228); 国家自然科学基金项目(U0733003、40876027); 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB411706)

作者简介: 林秋金(1985—), 女, 福建省上杭县人, 硕士研究生, 现从事地震数据处理研究。E-mail: linqj99@126.com

通信作者: 阎贫(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海洋地质与地球物理研究。E-mail: yanpin@scsio.ac.cn

中生界蕴藏的石油资源量占全球石油资源量的80.4%，天然气占全球62.9%，在所有层系中遥遥领先^[1]。我国南海北部潮汕坳陷是以中生界为主体的沉积坳陷，被认为是南海油气勘探的重要领域。

潮汕坳陷具有典型的新生界和中生界上、下两个构造层^[2]：1)海底以下至T_g层约1000m厚的地层为上构造层，属晚第三纪的海相沉积，地震反射连续稳定，波组特征清楚；2)而代表中生界的T_g以下的下构造层地震反射杂乱，连续性差。研究区地震资料的多次波问题尤其突出，包括海底多次波、T_g界面全程多次波以及层间多次波等^[3]。为了改善地震资料质量，提高深层地震反射品质，使得中生界油气勘探局面有所突破，针对本区多次波类型多，周期各异的情况，中国海洋石油总公司(China National Offshore Oil Corporation, CNOOC，简称中国海油)在1997—2001年期间通过招、投标方式选择专业处理公司进行资料处理^[3]。通过处理和解释人员的共同分析与研究，认真识别多次波，尤其是识别与T_g层和海底有关的多次波，并选取去多次波的有效组合方案，多次波压制得到了明显改善^[3]。

早期在本区的地震排列长度较短(约3000m)，目前在深水区的地震勘探一般采用长电缆(>6000m)

采集。本文结合该区的地质特征和地震资料特点，拟通过实际记录中多次波的特点分析，结合多次波形成理论，通过反复试验，选取去多次波的最佳模块和组合方案，并与速度分析相结合，采用速度分析-去多次波迭代方法，制定出相应的多次波压制处理技术方案，最终实现有效压制多次波、突出有效反射的良好效果，并为长电缆地震资料压制多次波提供理论指导。

1 多次波的特点分析

研究区的原始地震记录存在多种类型的多次波，严重地干扰甚至屏蔽了中深层的有效反射。由该区的地震剖面可看出，T_g反射面(第三系底界)及其以上的上构造层的反射信号均可连续追踪且波组特征好，而T_g反射面以下的下构造层的反射信号，大部分地区因受多次波和噪声干扰，有效反射能量弱而难以识别和追踪。

本文所用的地震数据为广州海洋地质调查局“探宝”号2004年采集的长排列地震记录，测线及其位置如图1所示。地震数据的采样间隔为2ms，炮间距50m，道间距12.5m，最小炮检距为250m，最大偏移距为6237.5m。

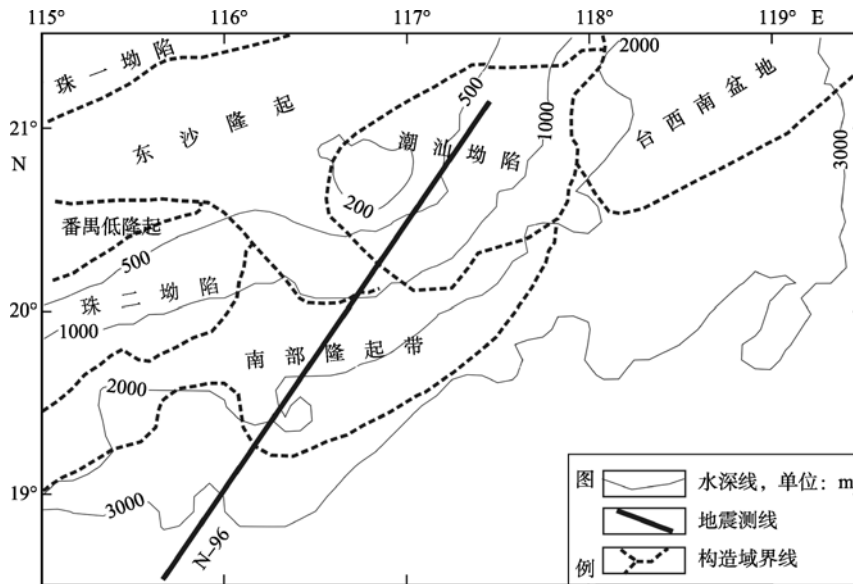


图1 潮汕坳陷构造位置及地震测线分布图

Fig. 1 Tectonic framework of Chaoshan Depression and location of a seismic survey line

1.1 多次波的识别

研究区的海底和T_g反射面均为强反射界面，多次波形式多样。我们通过共反射点(Common Depth Point, CDP)道集、叠加速度谱、不同的初叠剖面、自相关分析来识别多次波：1) 在速度谱上寻找

是否存在低波速异常；2) 在叠加剖面上查看该波组是否是更浅的某个强波组时间的两倍(对全程多次波而言)；3) 分析单炮记录、CDP道集、近道叠加或者初叠剖面的自相关图上的相关性。纵观南海北部潮汕坳陷二维地震资料，发现多次波主要有以下几

个方面的特点。

1) 由叠加速度谱可以分析研究区多次波与一次波之间的周期性和速度差异、多次波产生的层位以及发育情况。从原始叠加速度谱看(图 2), 1.5s 以下中深层多次波能量团异常发育, 同相轴 A—J 都是多次波,

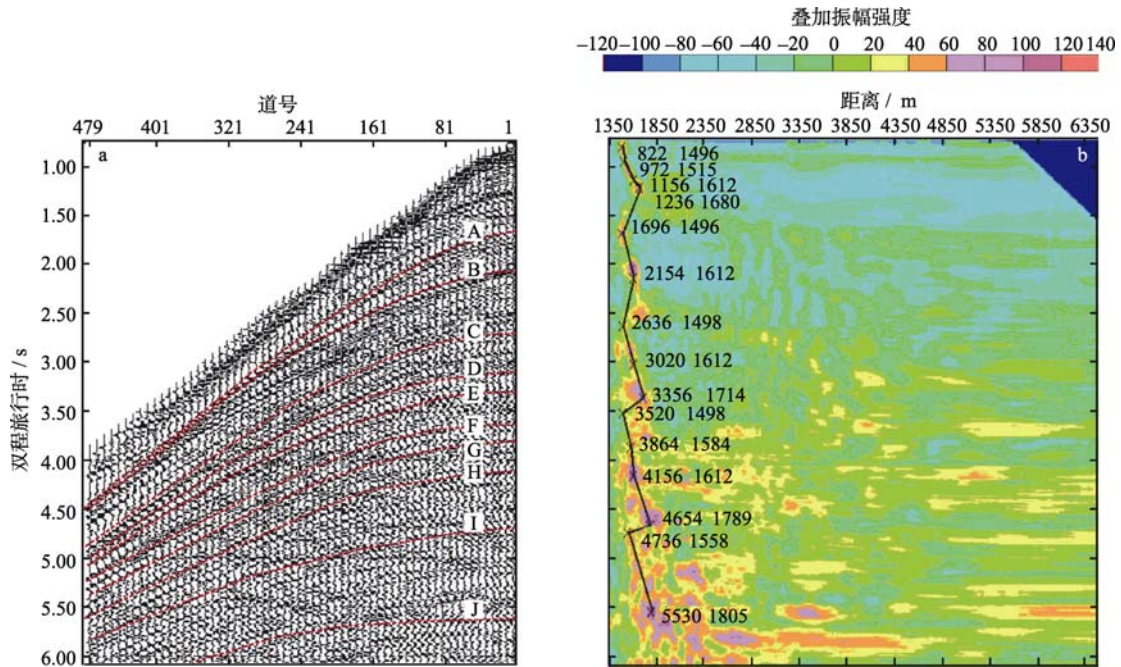


图 2 原始 CDP 道集和叠加速度谱

- a. 中同相轴 A—J 都是多次波, 其中 A、C 和 F 是海底的全程多次波, B、D 和 H 是 T_g 界面的全程多次波, 其余都是短程多次波;
b. 右图中折线拐点(叉号)旁边的每组数据对分别为该能量团对应同相轴的双程旅行时间和叠加速度

Fig. 2 One raw CDP gather of multi-channel seismic data and its stack velocity spectra

2) 通过不同叠加剖面可以判断研究区多次波的类型、产生的层位及纵、横向特点。从叠加剖面看, 多次波主要是海底和 T_g 反射面所产生的全程、层间多次波, 且能量强, 基本上全区发育。

3) 从地震地质分析, 由于海底和中生界顶界面都是强反射界面, 且受中生界顶界面强反射屏蔽作用的影响, 中、深层有效反射弱, 成像困难。

由上面的分析可知, 该区的多次波主要是海底和 T_g 强反射界面产生的全程多次和层间多次波, 能量强, 使中深层的有效波同相轴被掩盖。

2 组合压制多次波技术

不同的多次波压制方法有着不同的应用条件^[4-5], 尽管目前压制多次波的方法很多, 但在实际资料处理中可能遇到的问题往往比理论假设要复杂的多, 难以满足方法本身所要求的条件, 所以依靠一种手段很难较好地压制各种类型的多次波。本文尝试对研究区的地震资料联合应用零偏移距截距时间-射线参数(τ - p)域自适应预测反褶积、自由界面多次波

其中 A、C 和 F 是海底的全程多次, B、D 和 H 是 T_g 界面的全程多次波, 其余都是短程多次波。多次波能量较强, 有效波的反射相对较弱, 导致有效波的速度难以拾取; 多次波速度分布密集, 且相对稳定; 此外, 同一时间的多次波和一次波视速度差异较大。

衰减法(Surface-Related Multiple Elimination, SRME)和双曲线 Radon 变换方法进行多次波组合压制。

2.1 预测反褶积

对于海底鸣震和短周期的多次波, 多用反褶积的方法来压制。预测反褶积(图 3)是利用周期性特征压制多次波的滤波方法, 在压制虚反射、海底鸣震等多次波的同时, 压缩地震子波, 拓宽频谱, 提高时间分辨率。图 3a 为时间-空间(t - x)域预测反褶积, 其中预测步长为 16ms, 算子长度为 120ms, 预白噪声系数为 0.1%。为了对比说明, τ - p 域预测反褶积(图 3b)所选用的预测参数同 t - x 域。

试验(图 3a 和图 3b)表明 τ - p 域预测反褶积比时间域预测反褶积效果更好, 短周期多次波被有效地压制, 中生界内部 2.5—3.5s 处的部分弱有效信号被加强, 并且分辨率在一定程度上得到了提高。这是因为多次波在 τ - p 域内具有更好的周期性, 满足预测反褶积的应用前提。应用该方法, 需选取合理的预测步长、预测算子长度、预白噪声系数以及应用时窗, 防止中、深层有效波被扭曲。

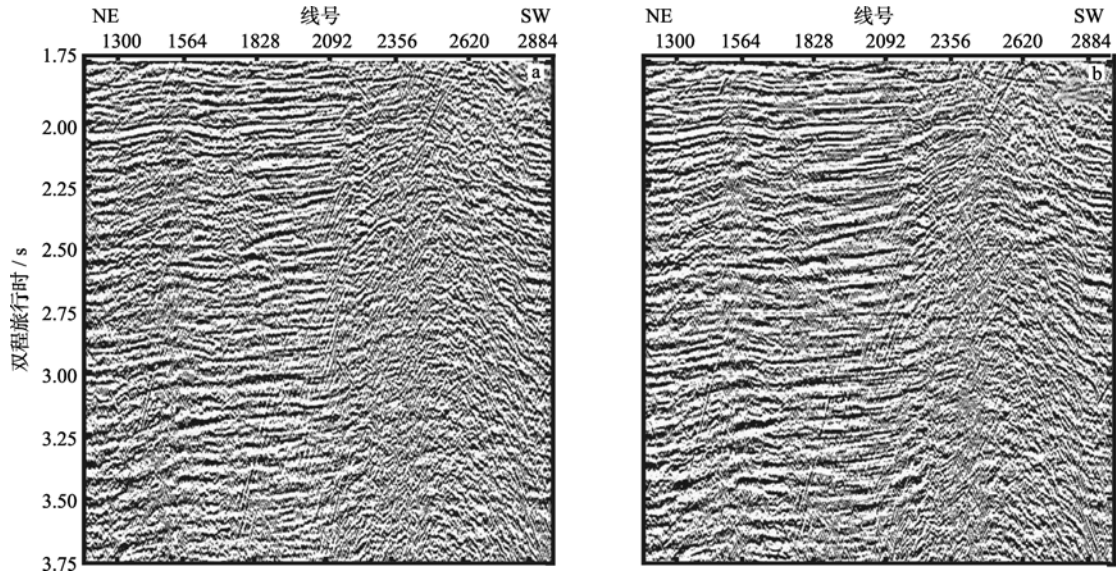


图 3 时间域预测反褶积叠加剖面(a)和 τ - p 域预测反褶积叠加剖面(b)
 Fig. 3 Stacking sections using predictive deconvolution carried out in the t - x domain (a) and in the τ - p domain (b)

2.2 自由界面多次波衰减法(SRME)

以上的多次波压制方法以波的传播时间周期性为理论依据。在认识到地震数据中主要的多次波能量来源于自由表面产生的多次波后, Verschuur 等^[6]提出了以波场褶积为理论基础的 SRME 技术, 该技术近年来在生产中得到了广泛应用^[7-8], 理论上, 它可以预测和衰减所有与自由界面有关的多次波, 不需要提供任何地下介质模型的先验信息, 预测是完全以原始数据为基础的。

自由表面多次波是指由地下介质反射的地震波到达自由表面后, 至少在自由表面发生一次下行反

射, 然后在地下经一定的传播途径后重新返回自由表面所形成的地震波。

SRME 技术通过两步法来实现^[6]: 多次波预测和自适应减去。首先, 由预处理后的共炮点和共接收点集褶积较准确地预测出所有表面多次波, 通过地震数据自身褶积, 一次反射波变成多次波, 低级多次波变成高级多次波, 从而预测出所有与表面有关的多次波; 然后, 将预测出的多次波从原始数据中减去, 使消除表面多次波后的总能量达到最小。

图 4 是用 SRME 技术压制多次波前后的动校正 CDP 道集, 由这个对比图我们不难发现, SRME 技

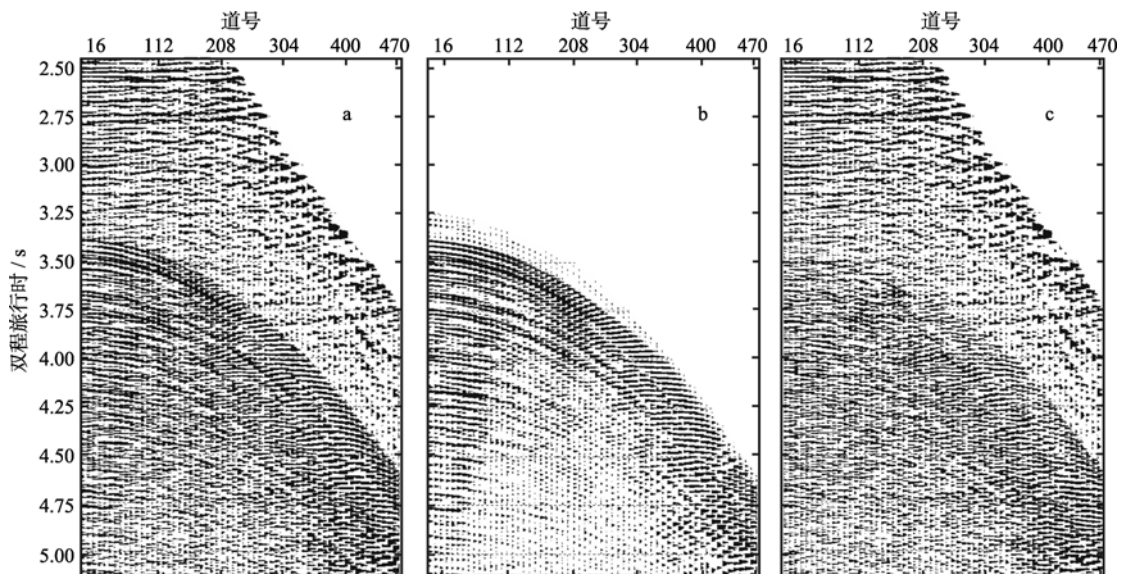


图 4 SRME 前的动校正 CDP1560 道集(a)、预测的多次波(b)和 SRME 后的动校正 CDP1560 道集(c)
 Fig. 4 One CDP gather with Normal Moveout (NMO) pre-SRME (a) and post-SRME(c), as well as predicted multiples (b)

术能够很好地压制近炮检距范围内的多次波。

然而, 实际处理过程中 SRME 对远炮检距多次波的压制并不是很理想(图 4), 这是因为空间假频、方向效应、有限孔径和有限孔径等因素的影响。针对 SRME 对远炮检距多次波压制不足的情况, 我们选择双曲线 Radon 变换来衰减远炮检距的多次波。

2.3 双曲线 Radon 变换法

反射波时距曲线接近双曲线。双曲线 Radon 变换方法^[9, 10]是根据有效波与干扰波的速度差异, 将 $t-x$ 域一次波动校正后的共中心点(CMP)道集经双曲

线拉冬变换转换到 $\tau-p$ 域, 根据有效波与干扰波在 $\tau-p$ 域的不同分布分离出噪声并进行压制, 然后由 $\tau-p$ 域反变换到 $t-x$ 域, 从而达到去干扰、提高信噪比的目的。

图 5 是双曲线 Radon 变换压制多次波前后的动校正 CDP 道集对比图, 压制多次波后的动校正 CDP 道集上, 远偏移距的多次波得到很好的压制, 有效同相轴被拉平。

由这个对比图我们不难发现, 双曲线 Radon 变换有效地压制了多次波, 弥补了 SRME 技术对远偏移距多次波压制的不足。

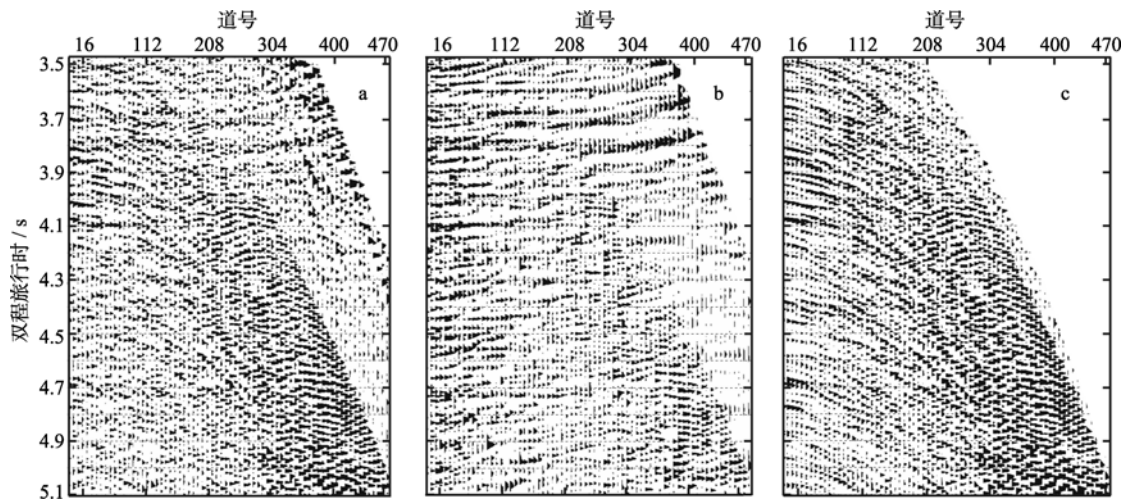


图 5 动校正 CDP1600 道集(a)、双曲 Radon 变换多次波压制后的动校正 CDP1600 道集(b)和(a)减(b)所得结果(c)
Fig. 5 One CDP gather with NMO (a), after Hyperbolic Radon transform (b) and result of (a) minus (b) (c)

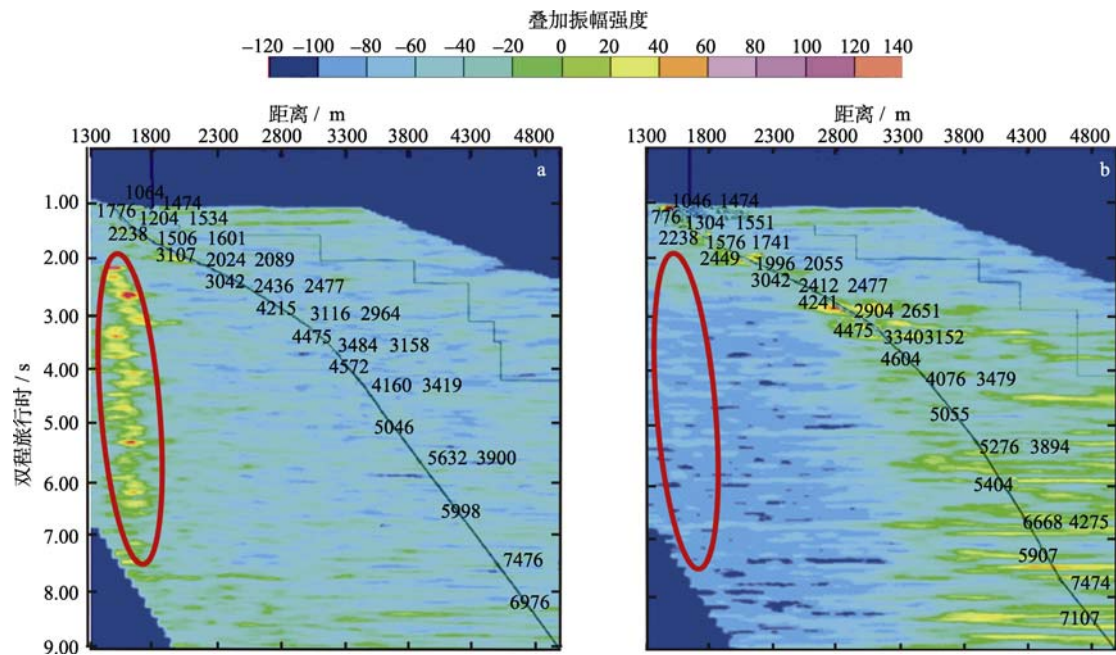


图 6 原始叠加速度谱(a)和组合法压制多次波后的叠加速度谱(b)

图中曲线代表有效波的叠加速度趋势线, 趋势线上的数值为相应层的层速度, 趋势线旁的每组数据对分别代表该能量团对应同相轴的双程旅行时间和叠加速度; 红色椭圆标注为多次波在组合压制前后的对比效果

Fig. 6 Stack velocity spectra before (a) and after multiple attenuation(b)

3 多次波压制效果分析

在明确多次波的类型和性质, 试验预测反褶积、自由界面多次波衰减法(SRME)和双曲线 Radon 变换的适用条件基础上, 应用上述组合方案对南海北部潮汕坳陷某段二维地震资料进行了多次波压制处理, 充分发挥上述 3 种滤波方法各自优点。 τ - p 域预测反褶积方法对短周期的鸣震和微曲多次波的压制效果较好, SRME 有效地压制自由表面多次波, 且在近炮检距范围内压制多次波效果很好, 而双曲线

Radon 变换是衰减长周期的层间多次波和未被充分压制的自由表面多次波很好的选择。

图 6 是压制多次波前后的叠加速度谱, 对比压制多次波前后的速度谱可以看出, 一次波能量聚集, 该组合很好地压制了多次波, 明显地突出了中深层的有效反射。图 7 是压制多次波前后的动校正 CDP 道集, 对比两图可看出同相轴被拉平, 多次波得到有效压制, 有效波显现出来。图 8 是应用该组合压制多次波后的叠加剖面, 可见多次波被明显压制, 剖面质量明显得到改善。

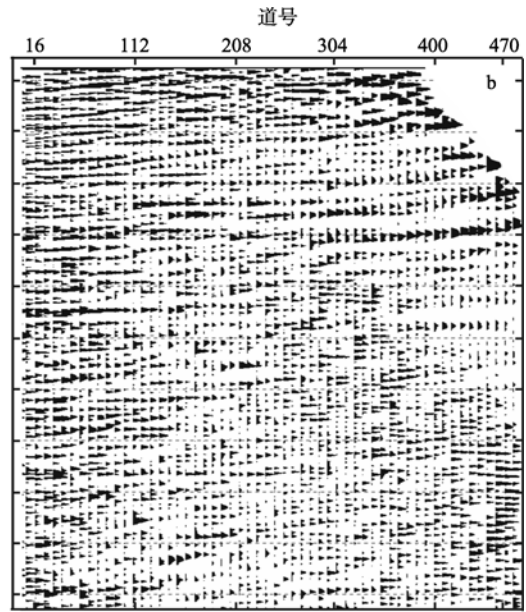
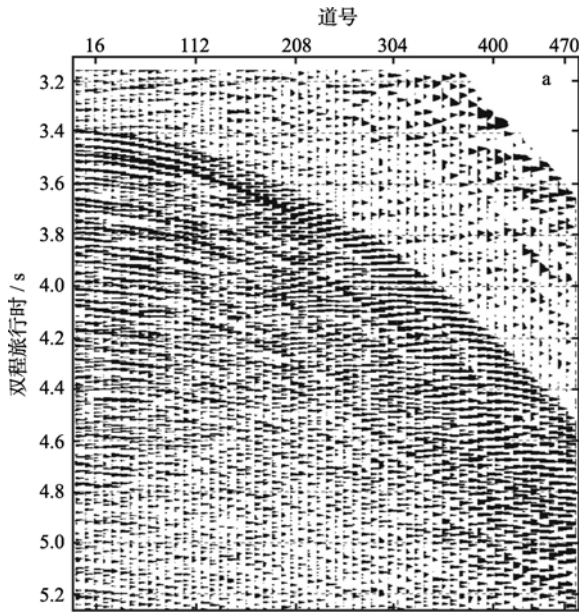


图 7 原始动校正 CDP1680 道集(a)和组合法压制多次波后的 CDP1680 道集(b)
Fig. 7 One CDP gather with NMO before (a) and after combined multiple attenuations (b)

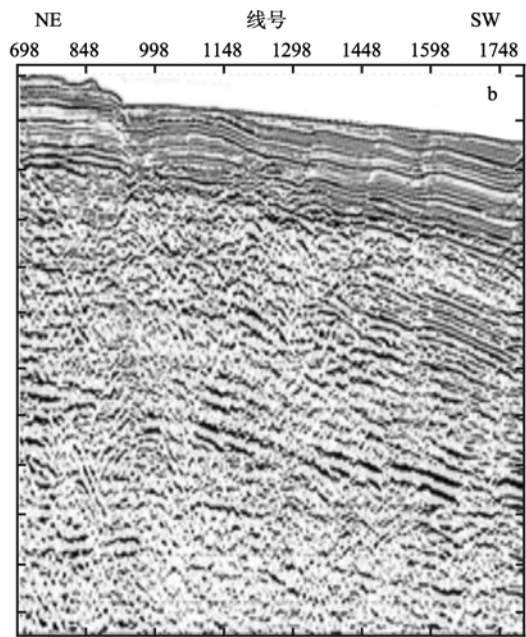
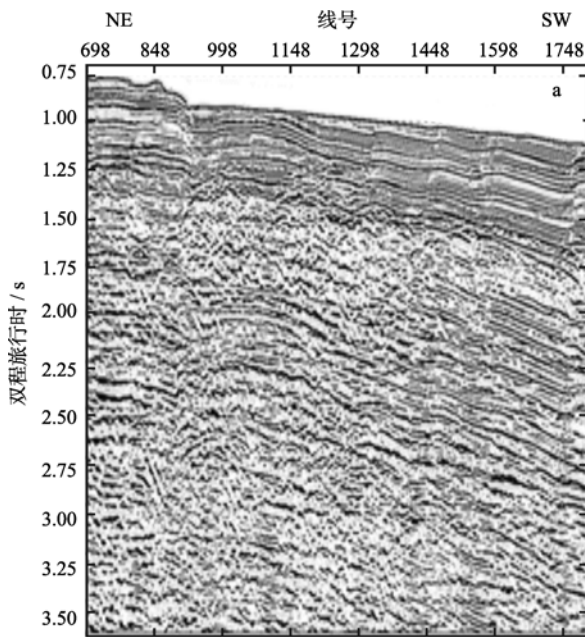


图 8 原始叠加剖面(a)和组合法压制多次波后的叠加剖面(b)
Fig. 8 Stacking sections before (a) and after (b) combined multiple attenuations

4 结论与认识

通过对南海北部潮汕坳陷二维地震资料多次波分析和压制处理研究表明, 区内主要存在海底全程多次波、T_g界面全程多次波及层间多次波等。对于短周期多次波, 本文采用 τ - p 域自适应预测反褶积, 该方法能有效地压制短周期与较长周期多次波; 对于中长周期多次波, 本文采用自由界面多次波衰减法 SRME 和双曲线 Radon 变换相结合的办法进行有

效压制, 其中, SRME 技术对近炮检距的多次波压制效果较好, 而对远偏移距的多次波压制不足, 而双曲线 Radon 变换对中远偏移距的多次波压制效果好, 近道效果差。这就利用了每种方法的优势, 弥补了其它方法的不足, 从而达到有效压制多次波的效果。因此, 在本区联合应用 τ - p 域自适应预测反褶积、自由界面多次波衰减法 SRME 和双曲线 Radon 变换组合压制多次波, 可为该区今后的长电缆地震数据处理提供经验。

参考文献

- [1] KLEMMER H D, ULMISHEK G F. Effective petroleum source rocks of the world: Stratigraphic distribution and controlling depositional factor[J]. Amer Assoc Petro Geol Bull, 1991, 75(2): 1809-1851.
- [2] 郝沪军, 林鹤鸣, 杨梦雄, 等. 潮汕坳陷中生界——油气勘探的新领域[J]. 中国海上油气:地质, 2001, 15(3): 157-163.
- [3] 陈隽, 郝沪军, 林鹤鸣. 潮汕坳陷地震资料的改善及中生界构造的新发现[J]. 中国海上油气:地质, 2002, 16(4): 271-278.
- [4] 刘长辉, 王建鹏, 曹军. 海洋多次波特征和压制方法初探[J]. 石油天然气学报:江汉石油学院学报, 2005, 27(4): 608-609.
- [5] 李丽青, 梁蓓雯, 徐华宁. 海上单道地震资料中多次波的衰减[J]. 石油物探, 2007, 46(5): 457-462.
- [6] BERKHOUT A J, VERSCHUUR D J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, Part 1: Theoretical considerations [J]. Geophysics, 1997, 62(5): 1586-1595.
- [7] 崔树果. 东海海域自由表面多次波压制方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008:1-103.
- [8] 王维红, 崔宝文, 刘洪. 表面多次波衰减的研究现状与进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 156-164.
- [9] 林文, 魏大力, 王建民, 等. Radon 变换多次波压制方法及应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2009, 31(4): 344-348.
- [10] MITCHELL A R, KELAMIS P G. Efficient tau-p hyperbolic velocity filtering[J]. Geophysics, 1990, 55(5): 619-625.