

海上浅地层剖面处理的 关键去噪技术

颜中辉, 栾锡武, 潘 军, 方 刚

(1 国土资源部油气资源和环境地质重点实验室, 青岛 266071;

2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

3 海洋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:在海上地球物理调查中,为了查明该海区的浅部地层结构和分布规律,浅地层剖面测量是一种不可缺少的重要手段;然而,海上数据采集过程通常会受到各种因素干扰,导致获得的浅剖资料噪声严重。其主频虽然较高,但信噪比较低,以致于在原始剖面中无法有效地识别地层。以辽河三角洲资料为例,针对剖面上存在的各种噪声类型,提出一些用于浅地层剖面资料处理的关键技术,以提高原始资料信噪比及分辨率为目的,为海洋地质构造的解释提供良好的基础资料。

关键词:浅地层剖面;信噪比;多次波压制;分辨率;振幅补偿

中图分类号: P313

文献标识码: A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2016.09010

浅地层剖面测量是一种基于水声学原理的连续走航式探测浅部地层结构和构造的地球物理方法,因其具有低耗、高效、直观的特点,在探查海底浅部地层结构,了解断裂构造的分布、埋藏古河道^[1]、浅层气^[2]、海底塌陷和滑坡等地质灾害情况^[3],在航道建设^[4]、管道检测^[5]等近海工程以及海沙资源调查^[6-8]、天然气水合物调查^[9]、冷泉探测^[10]等资源调查中得到了广泛的应用。为国民经济可持续发展、海域划界和国防建设提供基础地质资料。

近年来,青岛海洋地质研究所在辽东湾以查明该海区的浅部地层结构和分布规律为目的,开展了海洋辽河三角洲海岸带综合地质调查,利用浅地层剖面获得了较清晰的滨浅海区晚第四纪地

层反射的地震资料。但是,浅地层剖面测量在实际作业中容易受到周围环境的干扰,如涌浪、机械振动、螺旋桨转动以及电力干扰等次生干扰源的影响,测区的地震地质条件及水深条件等也是影响浅地层剖面质量的重要因素。导致很大程度上降低了采集资料的信噪比和分辨率,进而影响对地质结构的解释^[11-14],因此,必须对原始资料进行有效处理才能获得高质量的数据剖面。

由于浅层剖面地震资料无法获取速度信息,无法利用叠加来压制噪音,在数据处理中可以使用的方法有限,对于浅地层剖面资料的处理主要是参照常规地震资料的处理方法^[15],而单独针对浅地层剖面数据处理方法的研究不多。处理的重点是增强资料的信噪比,在处理中重视滤波技术、多域去噪技术,道内道间能量均衡、补偿技术等^[16-17]。Quinn 等^[18]在已知震源特征前提下采用相关、反褶积以及预测滤波等方法对 chirp 型浅剖数据处理方法进行了系统研究;吕国涛^[13]等利用图像处理方法对浅剖图像进行了滤波处

收稿日期:2016-04-28

基金项目:山东省自然科学基金培养基金(ZR2015PD006);
行业基金(201511037)

作者简介:颜中辉(1986—),男,硕士,助理研究员,主要从事海洋地震资料处理方面的工作。E-mail:zhonghui4564573@163.com

理;冯强强^[15]等利用 P70 浅地层剖面仪采集的地震数据进行相关去噪、时变增益和反褶积处理。

借鉴了常规处理浅地层地震资料干扰的方法,对辽河三角洲采集的浅地层剖面进行了噪声分析,对剖面上出现的多次波、相干噪声针对性的提出去噪方法,更进一步通过能量补偿处理提高数据的信噪比,消除了干扰波和能量损失对原始资料的污染,为浅地层剖面资料的后续分析解释工作提供了理想的基础资料。

1 关键处理技术

浅地层地震资料中存在的主要问题是噪声严重。地震资料噪声分为有源噪声和环境噪声,有源噪声是由震源或次生震源形成的干扰背景,包括直达波、多次波、气泡效应等。其中多次波是海上地震最主要的有源噪声之一,对地震资料的质量影响最严重。环境噪声主要是洋流波浪、机械振动以及船动力干扰等引起的,其随机产生,分布较均匀,在时间剖面上呈不规则形态,构成地震记录的主要背景。涌浪噪声、各种线性或随机噪声则为环境噪声。此外,由于地层对高频信号的吸收衰减作用,导致中深层的位置能量很弱,难以识别有效的同向轴。同时,受风浪影响,反射同相轴产生时移而抖动,成波浪起伏状,一些精细构造的成像畸变,导致剖面的信噪比和分辨率明显降低。

针对上述问题,处理的关键是信噪分离,提高资料信噪比,使得剖面能够清楚反映目标地层特征。具体处理目标如下:①利用 F - X 域预测去噪技术压制随机噪声,消除同向轴抖动,提高资料的整体信噪比^[19,22];②利用 SRME 技术压制多次波,恢复被覆盖地层的成像^[14];③利用球面发散补偿和 F - K 域振幅频率补偿加强中深层的能量,恢复地层的构造信息^[20,21]。

1.1 F - X 域预测去噪技术

针对海洋随机低速噪音采用 F - X 域相干噪音压制方法,该方法是将每道通过傅里叶式变换从 t - x 域变换到频率—偏移距域,频率—偏移距域炮记录表达式为:

$$d(\omega, x) = s(\omega, x) + c(\omega, x) + r(\omega, x) \quad (1)$$

式中: $d(\omega, x)$ 为地震信号;

$s(\omega, x)$ 为有效信号;

$c(\omega, x)$ 为相干噪音;

$r(\omega, x)$ 为随机噪音;

ω 为角频率;

x 为炮检距。

然后运用扇形滤波器,使用最小平方方法估算特定视速度范围内的噪音,最小平方误差估算表达式:

$$\Phi(\omega) = \sum [d(\omega, x_n) - f(\omega, x_n) a(\omega, x_n)]^2 \quad (2)$$

式中: $\Phi(\omega)$ 为最小平方函数;

$f(\omega, x_n) a(\omega, x_n)$ 为相干噪音;

$f(\omega, x_n)$ 为时间延迟和超前算子;

$a(\omega, x_n)$ 为加权函数。

通过将噪音从数据中减去后,进行傅里叶反变换,将数据变回到时间—偏移距域,从而得到压制噪音的效果。

1.2 SRME 技术压制多次波

假设一个无限带宽的平面波向地下传播,若不考虑自由表面因素的影响,它将产生一个包含所有一次波和层间多次波的地层脉冲响应 $x_0(t)$ 。如果这些波遇到自由表面,它们将作为二次震源在自由表面反射点处全部反射回地下介质中,形成一阶表面多次波,因此,所有一阶自由表面多次波可以表示为:

$$m_1(t) = -x_0(t) * x_0(t), \quad (3)$$

式(3)中,等号右边的负号为自由表面的反射系数-1。同理,当一阶多次波到达自由表面后又会成为产生二阶多次波的源。所以二阶表面多次波可以表示为:

$$m_2(t) = -x_0(t) * m_1(t) = x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) \quad (4)$$

由此类推,包含所有自由表面多次波的地震波总体响应 $x(t)$ 就可以表示为:

$$x(t) = x_0(t) - x_0(t) * x_0(t) + x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) \quad (5)$$

根据褶积定理可以由公式(3)推导出不含表面多次波的地层脉冲响应为:

$$x_0(t) = x(t) + x(t) * x(t) + x(t) * x(t) * x(t) \quad (6)$$

在实际勘探过程中,震源子波是一个有限长

度的带限子波,并且在传播过程随时间和深度不断变化,若假设实际地震记录为 $d(t)$,消除表面多次波的地震记录为 $p(t)$,震源子波为 $s(t)$,则不含表面多次波的地层脉冲响应和地震波总响应可以分别表示为:

$$x_0(t) = s^{-1}(t) * p(t) \quad (7)$$

$$x_0(t) = s^{-1}(t) * d(t) \quad (8)$$

因此,当考虑震源的子波特性时,消除表面多次波的地震记录可以表示为:

$$p(t) = d(t) + s^{-1}(t) * d(t) * d(t) + s^{-1}(t) * s^{-1}(t) * d(t) * d(t) * d(t) + \dots \quad (9)$$

公式(9)为一维介质平面波入射情况下自由表面多次波的衰减公式,如果知道震源子波就可以根据该式将地震记录中自由表面多次波消除。但通常情况下,震源子波是未知的,因而 SRME 的具体实现过程分为两步:模型预测和信噪分离,即首先通过地震数据自身褶积得到自由表面多次波模型,然后再利用自适应相减将其在原始地震记录中减去得到去除多次波以后的地震记录。

目前,自适应相减法主要包括自适应匹配滤波方法、基于模式识别的方法和基于独立变量分析的方法,其中基于一次波能量最小准则的自适应匹配滤波方法是最为常用的方法,此方法运算稳定,计算效率高,分两步实现。

第1步:利用最小二乘法计算匹配滤波算子 $f(t)$:

$$f(t) = \min \| d(t) - f(t) * m(t) \|_2^2 \quad (10)$$

第2步:应用自适应匹配滤波算子,然后相减:

$$m'(t) = f(t) * m(t) \quad (11)$$

$$m(t) = d(t) * m'(t) \quad (12)$$

式(11)、(12)中: $m(t)$ 为预测的多次波模型;

$m'(t)$ 为实际的多次波记录。

1.3 振幅补偿方法

1.3.1 球面发散补偿

地震波在传播过程中,由于其能量的发散和衰减以及地层的吸收作用,导致地震波能量在纵向上表现为浅层能量强,中、深层能量弱,因此,在各种去噪手段实现之前,首先要对资料进行球面扩散补偿,以提高资料的保真度。其实现过程是对数据加增益恢复函数以校正波前(球面)扩散对振幅的影响,达到能量补偿的效果。增益是一种

时变比例,这种比例函数根据所期望的规则确定。这就是加一几何扩散函数,将它与在每一时间抽样上的道振幅相乘。而几何扩散函数依赖于与在一次反射波有关的平均一次波速度函数及旅行时。该函数与特定工区的反射波有关,且应用指数增益函数来补偿衰减。

1.3.2 F-K 域振幅补偿

为了达到浅地层剖面高分辨处理的要求,频率和振幅的综合补偿也是常用的补偿方法之一。F-K 域振幅增强是一种 F-K 域去噪方法,其原理是沿着地震道选取一定长度的时窗,利用二维傅里叶变换将 $d-x$ 到 F-K 域,得到地震记录的时频分布谱 $x_m(f_m, T_k)$,用 $x_m(f_m, T_k)$ 求出地震数据的 $x_m(f_m, T_k)$ 。

$$X_m(f_m, T_k) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}+T_K}^{\frac{T}{2}+T_K} | x_m(f_m, T_k) g(t - T_k) | dt \quad (13)$$

式中: $g(t)$ 为平滑函数。

然后逐点递推求出每一个频带的吸收系数 $a(f_m, T_k)$;

$$a(f_m, T_k) = \frac{X_m(f_m, T_k)}{X_m(f_m, 0)} \quad (14)$$

进而求出每一个频带的衰减比率:

$$b(f_m, T_k) = \frac{a(f_m, T_k)}{a(f_0, T_k)} \quad (15)$$

最后, $b(f_m, T_k)$ 的倒数加权相应频带的信号,用加权后的信号进行反傅里叶变换得到补偿后的地震数据。

2 效果实例

2.1 球面扩散补偿效果

浅地层剖面属于高分辨资料,主频较大,频带较宽,使得地震波在往下传播的过程中能量衰减很快,从图1中可以看出,剖面在200 ms以下能量很弱,基本看不见有效的同相轴,而有时候处理的目标区正是中深层的地质信息,因此,采用球面扩散补偿能有效得补偿中深层的信息。由于单道数据无法获取速度信息,同时单道数据探测深度较浅且可看作是零偏移距剖面,因此,可通过时间 T 补偿来补偿损失的深层反射能量。本文以辽河

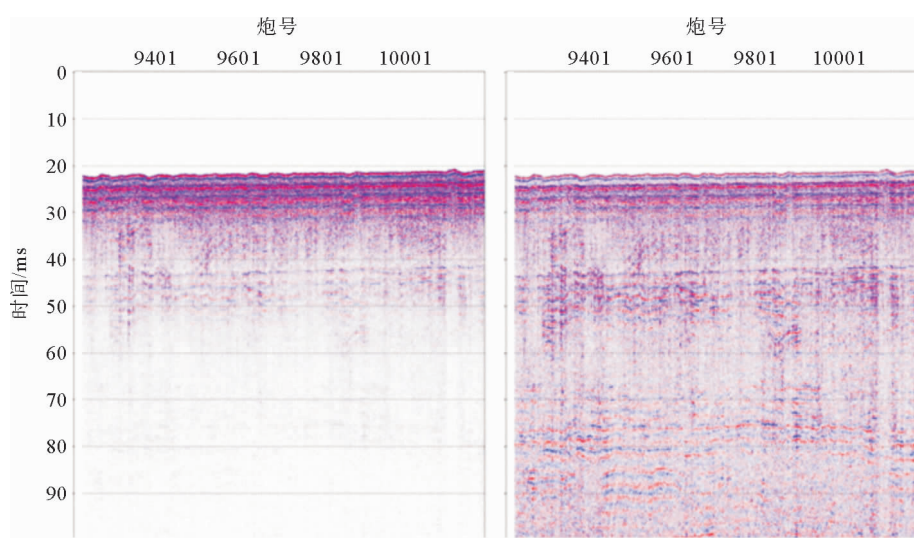


图 1 球面扩散补偿前后对比图

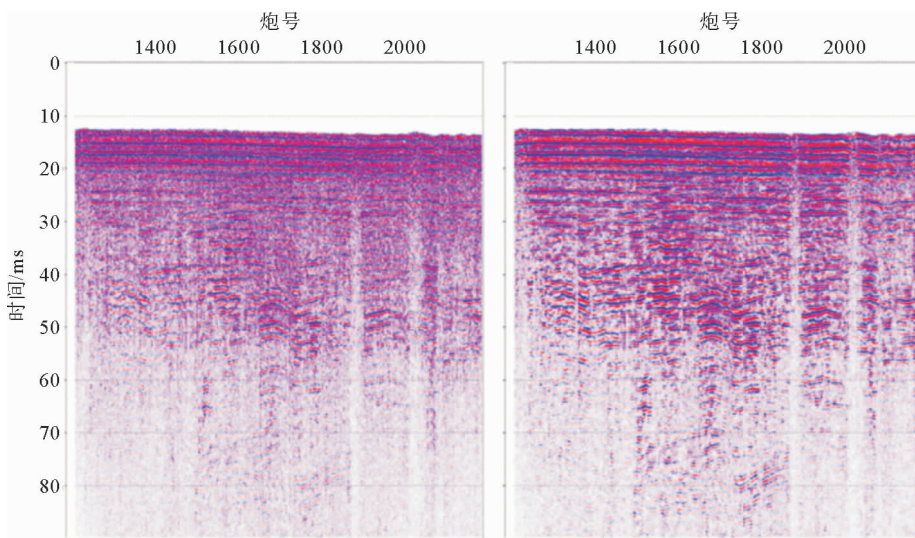
Fig. 1 Comparison of sections Pre- and post- processing by Spherical spreading compensation

三角洲浅剖数据为例进行相关处理。图 1 是采用球面扩散时间 T 补偿前后的剖面对比,从右图中可看出,补偿后的剖面深部信号得到了加强。中深层的信息得到恢复。

2.2 随机噪声压制效果

对单道数据而言,不存在多次覆盖技术,因此剖面中的随机噪声较严重。随机噪声压制是为了提高剖面的信噪比,使剖面的同相轴更连续清晰。本次处理过程中使用了 $F-X$ 域预测滤波去噪技术,该技术假定在 $F-X$ 域相干信号是可预测的,

而随机噪声是不可预测的,并假定同相轴是线性的,通过傅里叶变换将地震数据变换到 $F-X$ 域,在 $F-X$ 域预测出相干信号,再经傅里叶反变换到 $T-X$ 域得到随机噪声压制后的剖面。该方法主要适用于比较水平或起伏变化平缓的反射层,对于有凸起或凹陷的反射波组来说,会削弱部分有效能量,模糊地震波组的真实特征,所以在处理中采取了少数道间的横向滤波。从图 2 的随机噪声压制前后的剖面对比可以明显看出随机噪声压制后的同相轴更为连续清晰,分辨率得到了提高,更有利于地质构造的解释工作。

图 2 $F-X$ 域预测滤波去噪压制随机噪声效果图Fig. 2 Suppressing random noise using $F-X$ domain prediction denoising

2.3 多次波的压制效果

与其他海上资料一样,多次波也是浅剖资料中存在的突出问题。一直以来,预测反褶积是浅剖资料处理中消除多次波的主要方法,但该方法严格的假设条件使其往往难以获得好的应用效果。SRME 是一种衰减自由表面多次波较为有效的方法,目前已在海上多道地震资料多次波压制中得到广泛应用,但在单道或浅剖资料中的应用还比较少。图 3 为较浅水区海底多次波压制前

后的剖面对比,左图中可以明显看出海底多次波的存在并且与有效波交叉在一起,严重影响了资料的信噪比和分辨率。处理后,如图 3 右所示,海底多次波被明显压制,有效信息清晰地显露出来。图 4 为较深水区海底多次波压制前后的剖面对比,左图中显示该条测线受海底多次波干扰严重,不仅含有强能量的一阶海底多次波,而且二阶海底多次波也很明显。通过使用上述方法压制,一、二阶海底多次波能量得到有效地衰减,剖面信噪比得到提高。

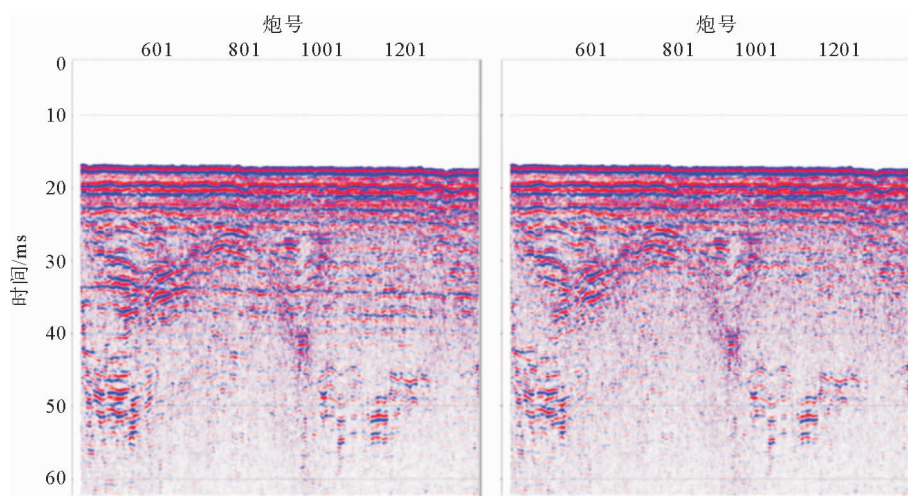


图 3 SRME 在较浅水区压制多次波的效果图

Fig. 3 Suppressing multiples using $F-X$ SRME in Shallow water

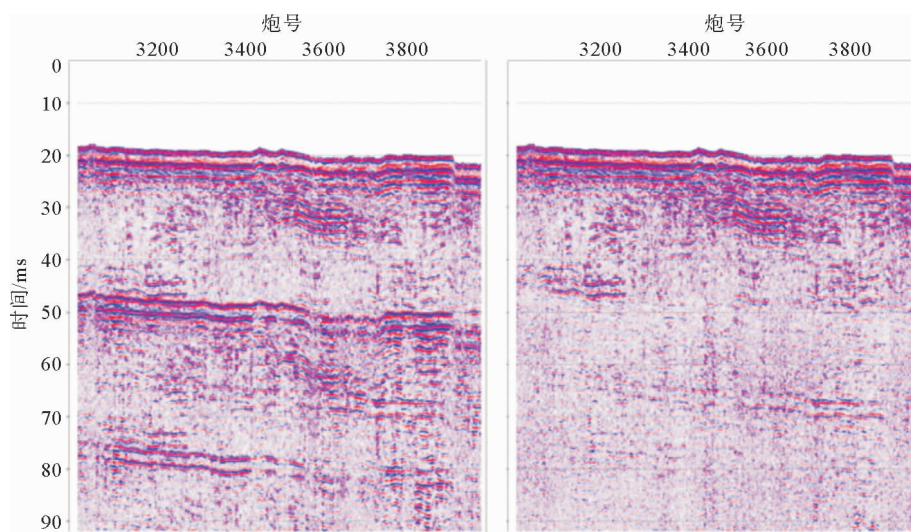


图 4 SRME 在较深水区压制多次波的效果图

Fig. 4 Suppressing multiples using $F-X$ SRME in deep water

2.4 频率振幅补偿效果

常规的球面扩散补偿只是在时间域上补偿振幅衰减的能量,而频率的损失基本没考虑,而 $F-K$ 域振幅补偿方法是很好解决了这一问题。它通过分时分频的处理,在 $F-K$ 谱的基础上,对振幅和频率进行加权处理,以此得到综合的补偿效果。图5为 $F-K$ 域振幅增强前后的剖面,上图为了原始的剖面,下图为了补偿后的剖面,对比两图可以看出应用 $F-K$ 域振幅增强后,剖面信号的噪比得到进一步提高。尤其相对于浅地层来说,中深层的分辨率有了较大的加强。

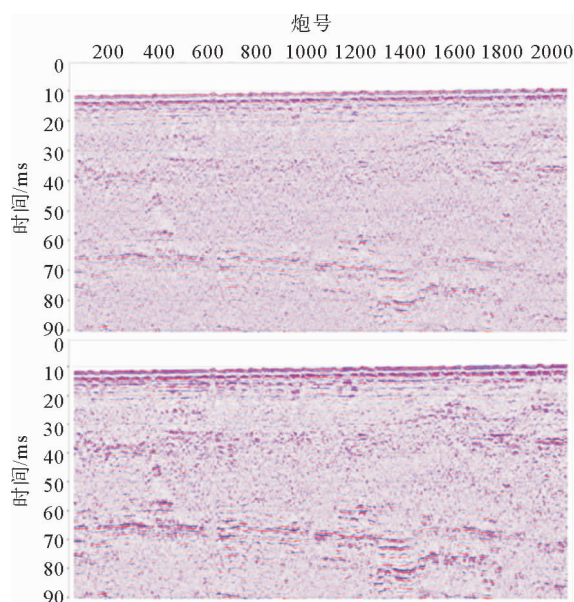


图5 $F-K$ 域振幅补偿前后对比图

Fig. 5 Comparison of sections pre- and post-processing by $F-K$ domain amplitude compensation

3 结论

浅地层剖面测量在海洋地质调查中有着广泛的应用,为查明海底沉积结构、沉积环境和浅部潜在的地质灾害因素等都提供了良好的基础资料。但是受采集环境以及作业条件限制,原始有效数据中混杂着各种噪音,对勘探目标的识别有很大的影响。因此对噪音进行有效地压制是地震资料高分辨处理的基础,如何尽量不损害有效信号的

同时合理地压制噪音,是处理过程中的关键步骤。针对辽河三角洲的浅剖资料的噪音类型。总结了2种针对性的去噪方法:①该区域多次波比较发育,利用 SRME 去噪技术进行压制;②中深层的能量衰减严重,利用振幅频率补偿方法进行补偿。通过上述针对性的处理手段可以提高资料的成像质量,对于后续资料的解释有着重要的意义。

参考文献:

- [1] 李平,杜军. 浅地层剖面探测综述[J]. 海洋通报, 2011, 30(3): 344-350.
- [2] 顾兆峰,张志珣,刘怀山. 南黄海西部地区浅层气地震特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(3): 65-73.
- [3] 王舒畋. 浅层物探技术在近海灾害地质与工程地质调查中的应用[J]. 海洋石油, 2008, 28(1): 6-12.
- [4] 曹双,罗红雨,曾飞. 浅地层剖面仪在近海航道工程中的应用[J]. 海岸工程, 2010, 29(2): 70-75.
- [5] 王继立,黄潘阳,胡涛骏,等. 浅地层剖面仪在海底管道检测中的应用[J]. 船海工程, 2013, 42(3): 161-163.
- [6] 赵铁虎,李军,张昇彪,等. 舟山海域海砂资源声地层剖面探测研究[J]. 物探化探计算技术, 2012, 33(3): 340-345.
- [7] 刘保华,丁继胜,裴彦良,等. 海洋地球物理探测技术及其在近海工程中的应用[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(3): 374-384.
- [8] 李培英,杜军. 基于浅地层剖面探测的近代黄河尾间流路变迁研究初探[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 3293-3298.
- [9] 倪玉根,郑玉龙,李守军. 南海神狐海域上陆坡去典型浅地层剖面的初步解释[J]. 海洋学研究, 2009, 27(1): 30-36.
- [10] 刘伯然,宋海斌,关永贤,等. 南海北部陆坡冷泉系统的浅地层剖面特征与分析[J]. 地球物理学进展, 2015, 58(1): 247-256.
- [11] Wunderlich J, Wendt G, Müller S. High-resolution echosounding and detection of embedded archaeological objects with nonlinear sub-bottom profiler[J]. Marine Geophysical Researches, 2005, 26(2): 123-133. doi: 10.1007/s1101-005-3712-y.
- [12] Verschuur D J. Seismic multiple removal techniques-past, present and future[M]. EAGE Publication, 2006.
- [13] 吕国涛,胡长青. 阿曼湾浅地层调查资料的处理研究[J]. 声学技术, 2010, 29(2): 162-166.
- [14] 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.
- [15] 冯强强,温明明,吴衡,等. 海洋浅地层剖面资料的数据处理方法. 2013, 29(11): 49-53.
- [16] 李丽青,梁蓓文,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.
- [17] 刘志刚, 谢言光, 陈 峰. 地震数据处理中噪声衰减方法的探讨[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(S1): 67-71.
- [18] Quinn R, Bull J M, Dix J K. Optimal processing of marine high-resolution seismic reflection (chirp) data [J]. Marine Geophysical Researches, 1998, 20(1): 13-20.
- [19] Ma Y Y, Li G F, Wang Y J, et al. Random noise attenuation by f-x spatial projection-based complex empirical mode decomposition predictive filtering[J]. Applied Geophysics, 2015, 12(1): 47-54. doi: 10.1007/s11770-015-0467-3
- [20] 李振春, 王清振. 地震波衰减机理及能量补偿研究综述[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1147-1152.
- [21] 李丽青, 陈泓君, 彭学超, 等. 海洋区域地质调查中的高分辨率单道地震资料关键处理技术[J]. 物探与化探, 2011, 35(1): 86-97.
- [22] 王兆湖, 王建民, 高振山, 等. 叠前自适应 F-X 域相干噪声衰减技术及应用. 地球物理学进展, 2013, 28(5): 2605-2610.

KEY DENOISING TECHNIQUES IN MARINE SUB-BOTTOM SHALLOW PROFILING

YAN Zhonghui, LUAN Xiwu, PAN Jun, FANG Gang

(1 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology,
Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China;

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

3 Function Laboratory of Marine Geo-Resource Evaluation and Exploration Technology, Qingdao National
Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: Shallow seismic profiling is one of the indispensable tools in offshore survey to reveal the geological structure and distribution pattern of waters and shallow strata. However, there are various factors which render influences onto offshore data acquisition and resulting in data noises. Even though the frequency is high and the ratio of noise/signal is low, we may still loss valid information in the original profiles. In this paper, we take the Liaohe River Delta as an example and put forward some key techniques for shallow seismic data processing to reduce the noises presented on the profiles so as to improve the noise/signal ratio and enhance the resolution of the original data for better interpretation of sub-bottom geological structures.

Key words: shallow seismic profile; noise/signal ratio; multiple attenuation; resolution; amplitude compensation