

基于目标函数的地表一致性反褶积方法

李国发¹, 彭更新², 翟桐立³, 李皓¹

(1. 中国石油大学 中国石油天然气集团公司物探重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油天然气股份有限公司 塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000;

3. 中国石油天然气股份有限公司 大港油田分公司, 天津 300280)

摘要: 常规的地表一致性处理方法是得到各个地震道的炮点分量和检波点分量之后, 计算两个分量褶积的预测反褶积算子, 将该算子作用在各自的地震道上, 由此消除激发和接收因素对地震子波的影响。当激发和接收因素变化较大时, 由于没有明确的目标函数, 其应用效果不甚理想。为此, 在利用常规方法实现地震道分解之后, 赋予每个地震道相同的目标函数。然后, 以炮点分量和检波点分量的褶积为输入函数, 利用维纳滤波算子对每个地震道进行地表一致性反褶积处理。实验结果表明, 该方法较好地消除了不同地震道之间激发和接收因素的差异, 地震子波的一致性得到改善。

关键词: 地表一致性; 反褶积; 目标函数; 地震子波; 分解

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2011)03-0027-06

Objective-function-based Surface-consistent Deconvolution Method

LI Guofa¹, PENG Gengxin², ZHAI Tongli³, LI Hao¹

(1. Key Lab of Geophysical Exploration of CNPC, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Tarim Oilfield Branch, PetroChina Co. Ltd., Korla, Xinjiang 841000, China;

3. Dagang Oilfield Branch, PetroChina Co. Ltd., Tianjin 300280, China)

Abstract: The conventional surface-consistent method calculated the prediction deconvolution operators of two component convolutions after seismic traces were decomposed into the components of shot and receiver and, applied to corresponding seismic traces to remove the effects of shooting and receiving factors on wavelets. When the traces were much different in the shooting and receiving factors, the application result was less satisfied due to the lack of definite objective function. Therefore, after the seismic traces were decomposed by conventional method, the same objective function was defined for each trace. Then, the Wiener filtering operator was estimated with the convolutions of shot component and receiver component as input function, and applied to each trace for surface-consistent deconvolution processing. The experimental results indicated that the method could remove much difference of shooting and receiving factors among seismic traces, and the consistency of seismic wavelets was improved.

Key words: surface-consistent; deconvolution; objective function; seismic wavelet; decomposition

根据地震剖面上的反射特征对地下介质的构造形态和储层物性进行分析和预测是地震资料解释工作的主要研究内容^[1-3]。在实际地震勘探中, 地震反射特征的变化除了受地下构造和岩性等地质因素的影响之外, 还受到激发条件、接收条件和近地表条件等非地质因素的影响^[4-5]。

图1是大港油田海陆交互带地震数据的一张振幅切片, 图中沿虚线两侧呈现明显的振幅异常, 该异常很容易被解释为地下大的断裂系统所造成的地震反射特征差异。实际上, 图中虚线是海岸线的位置, 虚线的右

收稿日期: 2011-01-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2007CB209608); 中国石油科技创新基金项目(2010D-5006-0301)。

作者简介: 李国发(1966—), 男, 河北大城人, 副教授, 博士, 主要从事复杂构造高分辨率成像的科研和教学工作。

E-mail: lgfseismic@126.com.

侧为滩浅海区域,左侧为陆地区域。两个区域地震资料的采集方式不同,滩浅海区域多使用气枪激发、水检接收,而陆地区域多采用炸药激发、陆检接收。图中的异常区带是由野外采集条件的差异引起的,而并非地下构造的真实响应。因此,消除非地质因素对地震反射特征的影响,凸显地质因素在地震记录上的反射特征对地震资料处理和解释都具有十分重要的意义^[6-7]。

Taner等^[8]提出利用地表一致性方法对近地表影响进行校正的基本思想,所谓的地表一致性,是指非地质因素对地震记录的影响只与炮点和检波点的位置有关;共炮点地震道具有相同的炮点校正量,共检波点地震道具有相同的检波点校正量;校正量与地震波的路径和

反射时间无关^[9]。Levin^[10]将地表一致性的思想应用于校正激发和接收因素对地震子波的影响,提出了地表一致性反褶积方法,该方法提出不久就在工业界取得了迅速的推广和应用,在地震资料处理和解释中发挥了重要作用。

其后,许多学者对地表一致性反褶积的算法进行了改进和优化^[11]。Cambois等^[12]在对数谱域实现了地震记录的分解,将地表一致性反褶积和其他地表一致性处理纳入统一的理论框架。Cary等^[13]将地震记录分解为炮点、检波点、中心点和炮检距四个分量,提高了由地震记录估算炮点和检波点分量的精度。李生杰等^[14]采用共轭梯度法在时间域对地震记录进行谱分解处理,改善了地表一致性的处理质量。

上述的研究工作大都集中在地震记录的分解上,即如何由地震记录更加准确地估算出激发因素和接收因素对地震子波的影响。但是,在得到炮点和检波点分量之后,如何消除激发和接收因素差异对地震记录的影响,讨论得很少,基本上都是沿用预测反褶积的做法,即将炮点分量和检波点分量褶积得到炮点和检波点的综合响应,然后对每个地震道的综合响应进行相同步长的预测反褶积来消除激发和接收因素对地震子波的影响。当激发和接收因素变化较大时,这种地表一致性反褶积方法不能很好地将激发和接收因素校正到统一的目标函数上去。

为此,本研究在对常规地表一致性反褶积方法深入剖析的基础上,提出了基于目标函数的地表一致性反褶积方法,并利用模型与常规方法进行了效果对比。

1 基本原理

设有第*i*点激发、第*j*点接收的地震记录 $x_{ij}(t)$,其中心点和炮检距分别计为*k*和*l*,且 $k = \frac{i+j}{2}$, $l = |i-j|$,按照地表一致性反褶积的基本思想,地震记录可以分解为与炮点、检波点、中心点和炮检距有关的四个分量 $s_i(t)$, $g_j(t)$, $e_k(t)$, $h_l(t)$ 的褶积,即

$$x_{ij}(t) = s_i(t) * h_l(t) * e_k(t) * g_j(t) \quad (1)$$

其中: $s_i(t)$ 表示激发因素对地震子波的影响,包括激发方式和激发点的近地表情况等; $g_j(t)$ 表示接收因素对地震子波的影响,包括接收方式和耦合情况等; $e_k(t)$ 是与中心点反射系数有关的分量; $h_l(t)$ 是与炮检距影响有关的分量。

将式(1)进行傅里叶变换并取对数,在对数谱域表示为

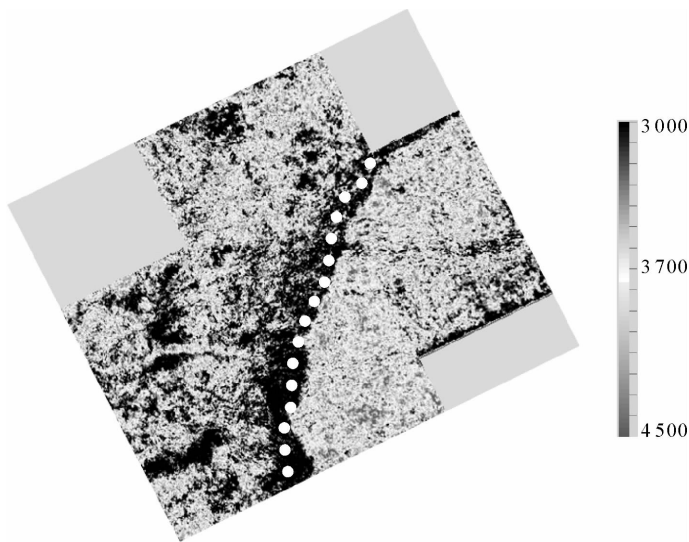


图1 海陆交互带地震数据振幅切片图

Fig.1 Amplitude slice of seismic data in paralic zone

$$X_{ij}(\omega) = S_i(\omega) + G_j(\omega) + H_l(\omega) + E_k(\omega) \tag{2}$$

其中： $X_{ij}(\omega)$, $S_i(\omega)$, $G_j(\omega)$, $H_l(\omega)$, $E_k(\omega)$ 分别是地震记录、炮点分量、检波点分量、炮检距分量和中心点分量振幅谱的对数。

设野外采集地震记录的总道数为 n_r , 炮点、检波点、中心点和炮检距的个数分别为 n_s, n_g, n_e 和 n_h , 则方程(2)构成了一个维数为 $n_r \times (n_s + n_g + n_e + n_h)$ 的超定方程组：

$$CP = A \tag{3}$$

其中： P 为由 $S_i(\omega)$, $G_j(\omega)$, $H_l(\omega)$ 和 $E_k(\omega)$ 构成的包含 $(n_s + n_g + n_e + n_h)$ 个元素的待求向量； C 为系数矩阵，是一个每行只有四个元素为 1, 其它元素都为 0 的稀疏矩阵，其维数为 $n_r \times (n_s + n_g + n_e + n_h)$ ； A 是由 $X_{ij}(\omega)$ 构成的包含 n_r 个元素的向量。

由方程组(3)确定未知向量 P 有多种方法, 比较常用的有 Gauss-Seidel 迭代法和共轭梯度法, 这不是本文讨论的重点。本文的重点是在利用方程组(3)确定了未知向量 P 之后, 也就是说当得到了每个地震记录的炮点分量 $s_i(t)$ 和检波点分量 $g_j(t)$ 之后, 如何消除不同地震道之间炮点和检波点分量的差异, 进而消除激发因素和接收因素对地震子波的影响。

常规的地表一致性反褶积方法在得到炮点分量 $s_i(t)$ 和检波点分量 $g_j(t)$ 之后, 由两者褶积得到炮点和检波点的综合响应 $o_{ij}(t)$, 即

$$o_{ij}(t) = s_i(t) * g_j(t) \tag{4}$$

在得到每个地震道的综合响应的 $o_{ij}(t)$ 之后, 对 $o_{ij}(t)$ 进行相同步长的预测反褶积, 得到预测反褶积算子 $q_{ij}(t)$, 将该算子作为地表一致性反褶积算子作用在地震记录 $x_{ij}(t)$ 上, 得到地表一致性反褶积之后的地震记录 $y_{ij}(t)$ 。

$$y_{ij}(t) = x_{ij}(t) * q_{ij}(t) \tag{5}$$

实际上, 当激发和接收因素差异较大时, 每个地震道上炮点和检波点的综合响应 $o_{ij}(t)$ 会有较大差异, 仅仅通过相同步长的预测反褶积很难将综合响应 $o_{ij}(t)$ 调整到一致的目标函数上去。为此, 需要预先为每个地震道设置统一的目标函数 $u(t)$, 将 $o_{ij}(t)$ 作为输入函数, $u(t)$ 作为希望输出函数, 利用维纳滤波由 $o_{ij}(t)$ 和 $u(t)$ 估算整型算子 $q_{ij}(t)$, 即

$$o_{ij}(t) * q_{ij}(t) = u(t) \tag{6}$$

由整型算子 $q_{ij}(t)$ 将不同地震道上炮点和检波点的综合响应 $o_{ij}(t)$ 调整到统一的目标函数 $u(t)$ 上去, 由此实现地表一致性反褶积, 消除激发和接收因素对地震记录和地震子波的影响。

2 模型实验

图 2 是本实验采用的地质模型。图中灰黑色代表泥岩, 速度为 2 800 m/s, 白色代表砂岩, 速度为 3 000 m/s, 砂体最大厚度 20 m, 最小厚度 5 m。采用声波方程(7)对地震波场进行正演模拟。

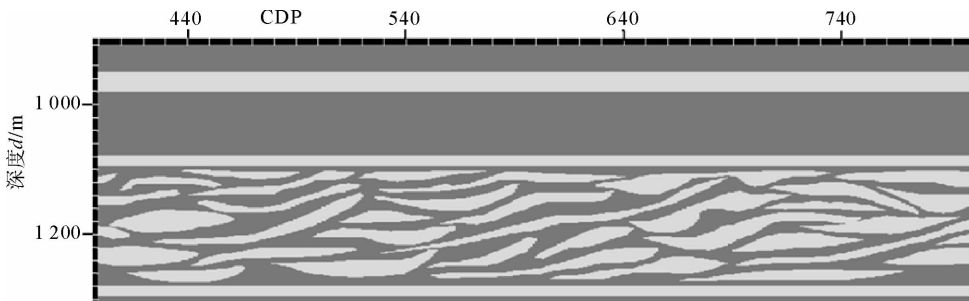


图 2 地质模型图

Fig. 2 Geological model

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -K \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}$$
(7)

其中： x 是水平方向的坐标； z 是垂直方向的坐标； ρ 为介质密度； K 为弹性模量； p 是压力波场； v_x, v_z 是质点速度的两个分量。弹性模量与纵波速度 v 的关系为

$$K = \rho v^2$$
(8)

正演模拟采用的主要参数分别为：道间距 20 m，炮间距 40 m，161 道记录，双边接收，最大炮检距 1 600 m，采样率 1 ms，记录长度 6 s，共模拟 181 炮地震记录。为模拟野外激发条件的变化，正演模拟采用不同主频的最小相位雷克子波，主频的变化范围为 25~45 Hz。图 3 显示了两个不同位置的共炮点道集，由于激发条件的差异，左图共炮点道集的频率明显低于右图的共炮点道集。

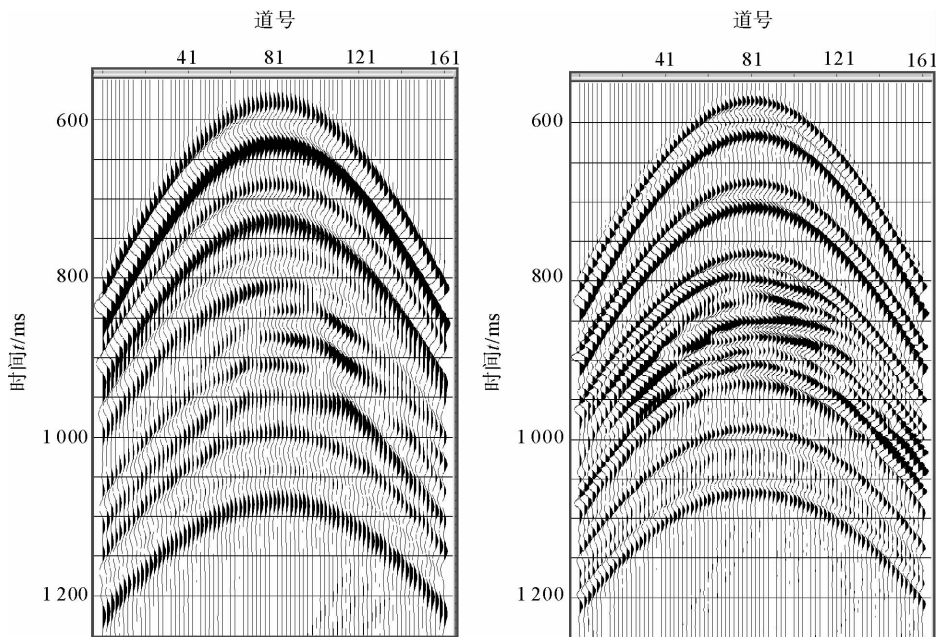


图 3 两个不同位置的共炮点道集图

Fig. 3 The diagram of two common-shot-point gathers at different locations

图 4(a)是地表一致性反褶积之前的 CDP 道集，由于激发和接收因素的差异，不同地震道之间的反射特征差异较大。利用这样的道集进行叠加不可能取得理想的叠加效果，也无法根据反射振幅随炮间距的变化进行可靠的 AVO 分析。在进一步处理之前，需要利用地表一致性反褶积技术消除激发和接收等非地质因素对地震反射特征的影响。图 4(b)是常规地表一致性反褶积的效果，与反褶积之前相比，反射特征在横向上的一致性得到明显改善，但仍然可以看到非地质因素的剩余影响。图 4(c)是利用本文方法进行地表一致性反褶积之后的结果，虽然并没有完全消除非地质因素对地震反射特征的影响，但应用效果较常规方法有了明显改进。

实际工作中人们经常使用自相关函数来考察地表一致性反褶积的效果。虽然自相关函数中只包含地震子波振幅谱的信息，不能反映地震子波在相位上的差异，但由于实际工作中很难对地震子波的相位进行估算和考证，一般假设地震子波为最小相位或者零相位(地表一致性反褶积方法也包含有地震子波为最小相位的基本假设)，因此利用地震记录的自相关考察地震子波在横向上的变化也是一种比较实际的评价方法。图 5

(a)是地表一致性反褶积之前共中心点道集的自相关函数,自相关函数在横向上的变化反映了地震子波在横向上的差异。图 5(b)是常规地表一致性反褶积之后的自相关函数,虽然自相关函数的一致性有所改善,但在视觉上还能够看到自相关函数之间的明显差异。图 5(c)是利用本文方法进行地表一致性反褶积之后的自相关函数,自相关函数在横向上的一致性明显改善。

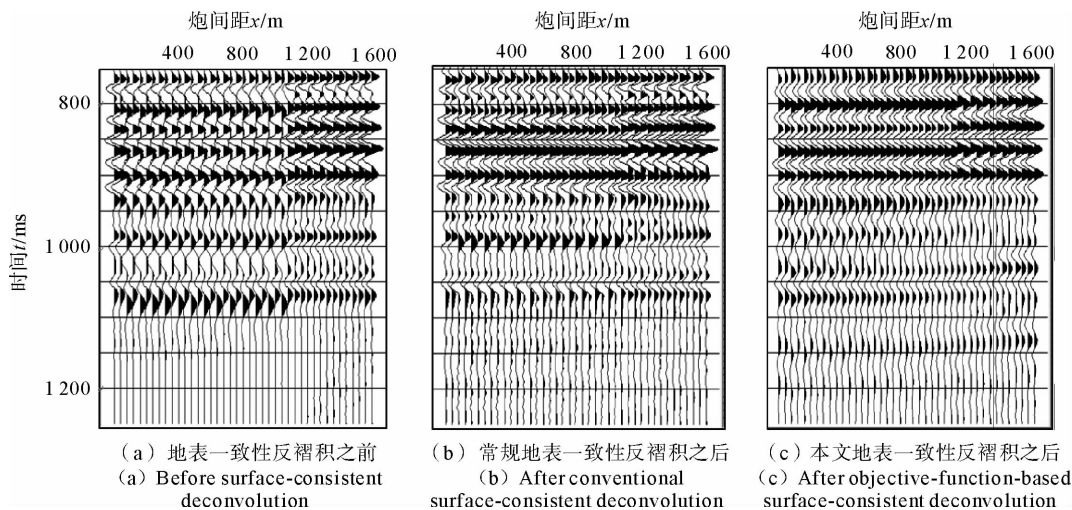


图 4 CDP 道集图

Fig. 4 The diagram of CDP gathers

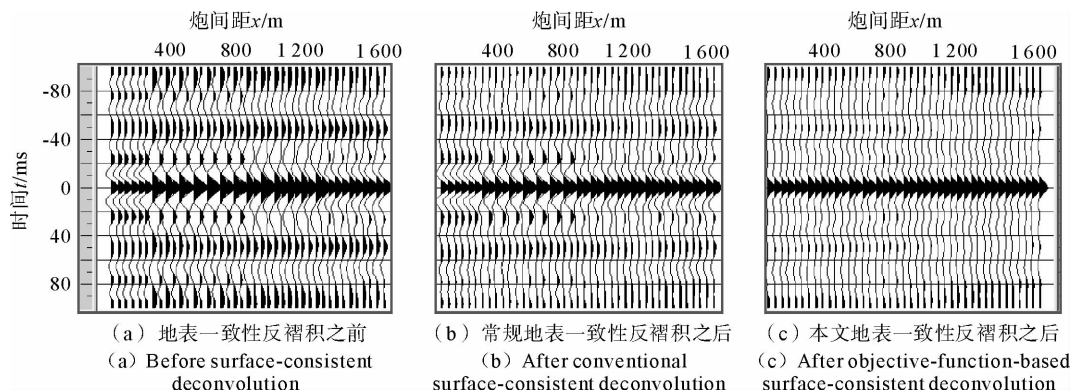


图 5 CDP 道集的自相关函数图

Fig. 5 The autocorrelation function diagram of CDP gathers

3 结论

1)地表一致性反褶积方法对于消除激发和接收因素对地震反射特征的影响,提高地震资料的处理质量和解释精度具有十分重要的意义;

2)常规的地表一致性反褶积方法在完成地震道分解之后,采用相同步长的预测反褶积算子来消除激发和接收因素对地震子波的影响。当激发和接收条件变化较大时,地表一致性反褶积之后仍然残存有较强的非地质因素的痕迹;

3)为炮点分量与检波点分量的综合响应设置统一的目标函数,由此估算的反褶积算子能够更好地消除激发和接收因素差异,改善地表一致性反褶积的应用效果。

参考文献:

- [1] LI G F, XIONG J L, ZHOU H, et al. Seismic reflection characteristics of fluvial sand and shale interbedded layers[J]. Applied Geophysics, 2008, 5(3): 219-229.
- [2] 李国发, 王尚旭, 马彦彦. 基于叠前波场模拟的合成地震记录层位标定[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(1): 29-33.
LI Guofa, WANG Shangxu, MA Yanyan. Well-ties with log synthetic seismogram based on prestack wavefields simulation [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2010, 34(1): 29-33.
- [3] 罗焕章, 季玉新, 王秀玲, 等. 转换横波合成记录制作方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(1): 37-40, 45.
LUO Huanzhang, JI Yuxin, WANG Xiuling, et al. Making P-SV shear wave synthetic seismic record[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2010, 34(1): 37-40, 45.
- [4] 凌云研究组. 叠前相对保持振幅、频率、相位和波形的地震资料处理与评价研究[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(5): 543-552.
LING Yun Research Group. Study of seismic data processing and appreciation based on prestack relative preservation of amplitude, frequency, phase and waveform[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(5): 543-552.
- [5] 仲伯军, 印兴耀. 复杂地区三维地震资料拼接中的一致性处理技术[J]. 石油物探, 2008, 47(4): 393-397.
ZHONG Bojun, YIN Xingyao. Consistent processing technology for splicing 3-D seismic data in complex area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(4): 393-397.
- [6] 陈志卿, 张兰. 子波一致性校正方法在地震资料处理中的应用: 以伊朗 Kashan 区块为例[J]. 石油物探, 2006, 45(2): 169-172.
CHEN Zhiqing, ZHANG Lan. Application of a wavelet coherence method data processing: For Iran Kashan block as an example[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(2): 169-172.
- [7] 郭树祥, 李建明, 毕立飞, 等. 频率域地表一致性反褶积方法及应用效果分析[J]. 石油物探, 2003, 42(1): 97-101.
GUO Shuxiang, LI Jianming, BI Lifei, et al. Frequency domain surface-consistent deconvolution and its application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2003, 42(1): 97-101.
- [8] TANER M T, KOEHLER F. Surface consistent correction[J]. Geophysics, 1981, 46(1): 17-22.
- [9] 牟永光, 陈小宏, 李国发, 等. 地震数据处理方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- [10] LEVIN S A. Surface-consistent deconvolution[J]. Geophysics, 1989, 54(9): 1123-1133.
- [11] VOSSSEN R V, CURTIS A, LAAKE A, et al. Surface-consistent deconvolution using reciprocity and waveform inversion [J]. Geophysics, 2006, 71(2): V19-V30.
- [12] CAMBOIS G, STOFFA P L. Surface-consistent deconvolution in the log/Fourier domain[J]. Geophysics, 1992, 57(6): 823-840.
- [13] CARY P W, LORENTZ G A. Four-component surface-consistent deconvolution[J]. Geophysics, 1993, 58(3): 383-392.
- [14] 李生杰, 施行觉, 郑鸿明, 等. 复杂地表条件反射振幅一致性校正[J]. 地球物理学报, 2002, 45(6): 862-869.
LI Shengjie, SHI Xingjue, ZHEN Hongming, et al. The consistent correction of seismic amplitude in complicated surface area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(6): 862-869.