doi: 10.11720/wtyht.2026.1357
邓宇轩, 孙成禹, 李佳楠. 井地联合近地表品质因子场构建方法[J]. 物探与化探, 2026, 50(2): 249-259. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1357
Deng Y X, Sun C Y, Li J N. Near-surface quality factor field construction with micro-logging and seismic data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(2): 249-259. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1357

井地联合近地表品质因子场构建方法

邓宇轩, 孙成禹, 李佳楠
(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘 要: 近地表结构通常较为松散, 且其厚度与速度在纵、横向均表现出剧烈变化, 不仅会显著吸收地震波能量, 还可引起严重的相位畸变, 从而显著降低地震记录的信噪比与分辨率。品质因子 (Q 值) 通常用来描述地层的吸收特性。面对复杂的近地表结构, 需同时考虑其纵、横向剧烈变化的特征, 才能构建出精确的品质因子场。本文首先通过分析常用 Q 值反演方法的适应性, 总结了基于微测井资料的品质因子反演方法的优选策略。为进一步提升近地表品质因子场建模精度, 提出了一种通过融合微测井资料的高精度信息和反射波资料的高采样率信息, 完成精确品质因子场模型构建的方法。实际数据测试结果表明, 该方法能够准确刻画地层 Q 值的横向变化细节, 补偿后地震波有效频带得以拓宽, 地震资料分辨率显著提高, 从而验证了本文方法的有效性。

关键词: 近地表; 相对衰减系数; Q 值; 品质因子场; 吸收补偿
中图分类号: P631.4;P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)02-0249-11

0 引言

近地表介质通常岩性松散、裂隙发育, 导致其品质因子 (Q 值) 普遍偏低, 对地震波产生显著的衰减效应, 且该效应在整个波传播路径中往往占据主导地位[1]。这一现象在近地表结构复杂、纵横向变化剧烈的山前带区域尤为突出。在石油勘探中, 近地表介质吸收引起的地震波能量衰减和相位畸变, 甚至可能超过地质构造或油气藏本身所引起的储层信息变化。通过对地震数据进行反 Q 滤波[2-3] 处理, 可以在一定程度上恢复被衰减的高频成分, 校正相位畸变, 从而获得更高保真度和分辨率的地下成像。实现高精度吸收衰减补偿的核心环节在于对补偿区域构建准确的品质因子场。因近地表地层通常高程起伏剧烈、纵横向速度变化显著, 具有复杂构造特征, 需借助多信息以构建精确合理的品质因子场模型。

精准反演出近地表单点的 Q 值是构建品质因子场的基础。自 Futterman[4] 建立岩石吸收衰减理论模型以来, 已发展出多种 Q 值反演方法, 大多基于常 Q 假设。现有的品质因子反演方法[5-7] 从广义上可分为时间域和频率域两类。时间域方法[8-9](如上升时间法、解析信号法等) 依赖地震波形的时变特征, 反演结果易受地震资料质量等因素影响。Gladwin 和 Stacey 提出了上升时间法, 将上升时间定义为第一周期的最大振幅与斜率之比, 并通过经验关系式估算 Q 值, 但该方法对数据质量依赖性较强, 即使在无噪声条件下, 其反演精度也会受限于采样率[10]; Engelhard[11] 基于复地震道理论提出了解析信号法, 通过提取地震信号的瞬时属性 (振幅、相位、频率等) 来量化地层衰减特征, 但在噪声条件下反演精度会显著下降。频率域方法[12-18](如频谱比法、频移法和能量比法等) 通常被认为具有更好的鲁棒性。Bath[19] 提出的频谱比法通过计算有效信号频段的衰减梯度来估算 Q 值, 但该方法抗噪性能较差[20-21]; Quan 等[22] 提出的频移法对噪声敏感性较低, 但要求地震波频谱符合高斯分布, 限制了其在实际应用中的普适性[23]; Wang 等[24] 基于子波衰减前后能量比提出了能量比法, 但其反演精度强烈依赖于预处理中

收稿日期: 2025-09-28; **修回日期:** 2025-12-15
基金项目: 国家自然科学基金项目“基于石油勘探面波与 P-导波的近地表纵横波速度一体化反演”(42174140)、“强吸收介质中面波和 P-导波频散-衰减特征及近地表参数一体化反演”(42574157) 资助
第一作者: 邓宇轩(2000-), 男, 硕士研究生, 专业方向为地质资源与地质工程。Email: 3011238640@qq.com

的振幅保真处理。此外,也出现了一些新方法:冯玮等[25]基于最优化思想使深部和浅部两个传播子波达到最佳匹配,从而提取 Q 值,但该方法需要地震数据具有较高信噪比,能够有效识别出复杂信号特征;余连勇等[26]对频移法进行改进,直接在时间域估算地震波频谱的质心和带宽,但是该方法更加依赖于地震子波谱的假设;张瑾等[27]对大地滤波因子进行多阶泰勒级数展开,根据振幅谱积分面积差值估计 Q 值,在复杂信号或者低信噪比情况下,可能会存在谱分割不准确、计算效率低等问题。以上方法各有优劣,反演效果均受限于信噪比、子波谱形态和数据保幅性等因素,在不同地震数据质量下的适用性各异。

不同来源的地震数据,在反演 Q 值时应采用不同的方法,频谱比法、能量比法、频移法等常用于VSP数据求取单点 Q 值,并不适用于地面反射波地震数据。针对地面反射波地震数据的 Q 值计算方法已有较多研究,Zhang 等[14]基于品质因子与峰值频率随射线路径变化之间的关系改进了峰值频移法,从CMP道集中提取出 Q 值;Chen[28]利用有效反射波信号的空间相干性来约束 Q 值反演,提出了多道 Q 值反演方法;苏勤等[29]基于地表一致性问题,结合微测井和地面反射波数据计算表层衰减系数与相对 Q 值。以上方法在近地表复杂条件下,难以同时兼顾介质纵横向剧烈变化的特征,导致反演精度有限。

为提高近地表 Q 场建模精度,本文提出了一种融合微测井和反射波数据信息的品质因子场构建方法。首先,分析基于微测井数据的品质因子反演方法精度的影响因素,总结反演方法优选策略,提高井点处纵向地层等效 Q 值的反演精度;然后,利用地面反射波数据计算横向地表的相对衰减系数,并通过微测井点处的高精度 Q 值,将相对衰减系数转换为等效 Q 值;最后,借助微测井资料的纵向高精度和反射波资料的横向高采样率,建立更为准确的近地表品质因子场。

1 基于微测井资料的单点品质因子反演

1.1 常用的 Q 值反演方法

迄今为止,针对微测井数据的 Q 值反演已发展出多种方法。本文选择能量比法、峰值频移法和频谱比法这三种常用方法,对其适应性进行分析。

1.1.1 能量比法

地层介质的吸收作用导致地震波在传播过程中发生能量衰减,基于子波振幅能量的衰减特性,可通过能量比法求取 Q 值。在震源激发后,初始子波的总能量为 E_1,经过时间 t 传播后,接收的子波总能量为 E_2,两者之间的关系可表示为

$$E_2=\int_0^{\infty}A_2^2(f)\mathrm{d}f=\int_0^{\infty}A_1^2(f)\exp\left(-\frac{2\pi t}{Q}f\right)\mathrm{d}f\approx\int_0^{\infty}A_1^2(f)\left(1-\frac{2\pi t}{Q}f\right)\mathrm{d}f=E_1\left(1-\frac{2\pi f_m}{Q}t\right)。\quad(1)$$

式中:$f_m=E_1^{-1}\int_0^{\infty}fA_1^2(f)\mathrm{d}f$,为未衰减地震子波功率谱的质心频率;$A_1$ 为初始子波的振幅谱;A_2 为衰减后接收的子波振幅谱。由此,得到地层品质因子:

$$Q=\frac{2\pi E_1}{E_1-E_2}=\frac{2\pi}{1-\gamma}。\quad(2)$$

式中:$\gamma=E_2/E_1$。

1.1.2 峰值频移法

峰值频移法是通过研究不同时刻的地震波的峰值频率特征来估算 Q 值。以井中观测为例,在地面激发后,对于接收井中深度分别为 h_i 和 h_j 的两道地震记录 $(h_i>h_j)$,若对应信号振幅谱的峰值频率分别为 f_{m1} 和 f_{m2},通过分析两道信号的峰值频率的移动,得到品质因子

$$Q=\frac{\pi\Delta t f_{m2}f_{m1}^2}{2(f_{m1}^2-f_{m2}^2)},\quad(3)$$

式中:Δt 为从深度 h_i 传播到 h_j 的初至波旅行时差。

1.1.3 频谱比法

以井口激发、井中接收为例。对于井口和井底检波点接收到的地震记录,对应的信号振幅谱分别为 A_{U} 和 A_{D},则井口和井底的两道记录的振幅谱对数表示为

$$\ln\left(\frac{A_{\mathrm{U}}}{A_{\mathrm{D}}}\right)=\frac{\pi f\Delta t_i}{Q}+C,\quad(4)$$

式中:$\Delta t_i=t_2-t_1$,为井口和井底检波器接收到的同一初至波旅行时差;C 为地震波从激发点接收器过程中发生的与频率无关的衰减(几何扩散、透射损失等)。由此得到地层的品质因子:

$$Q=\frac{\pi\Delta t_i}{k},\quad(5)$$

式中:k 为 $\ln(A_{\mathrm{U}}/A_{\mathrm{D}})$ 随频率 f 的变化率。

1.2 反演方法的适应性分析

为分析信噪比和有效频带对于反演方法精度的影响,本节设计了理论模型进行试验,并总结了不同条件下的反演方法优选。

1.2.1 信噪比(*SNR*)的影响

为测试不同信噪比对反演方法精度的影响,设计了一个三层水平层状介质,模型参数及观测系统如图1所示。基于粘弹介质模型,采用射线追踪正演方法分别合成了无噪声 (*SNR*=∞) 和含噪声 (*SNR*=1,3)

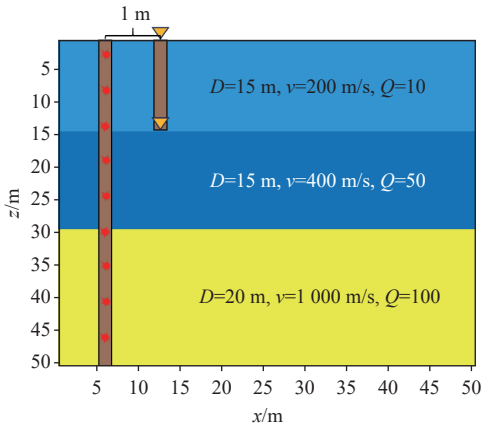


图 1　模型设置示意

Fig. 1　Diagram of model setting

的地震记录。震源采用主频 35 Hz 的 Ricker 子波，激发井深度为 50 m，接收井深度为 15 m，两井间隔 1 m。正演过程中未考虑几何扩散效应。时间样间隔为 0.25 ms，采样点数为 2 048 个，第一炮从 0.5 m 处激发，每隔 1 m 激发一次，共激发 50 炮，接收井井口和井底检波器接收到的地震记录正演波形如图 2 所示。

在模型测试中，将接收井的深度设定为低速层的厚度，使接收井中的井底检波器位于高速层内。选择第 50 炮 (即于激发井井底激发) 的地震记录进行计算，以确保地震波能完整穿过低降速带，井口和井底接收到的地震波振幅谱的差异仅源于低降速带的吸收衰减作用。

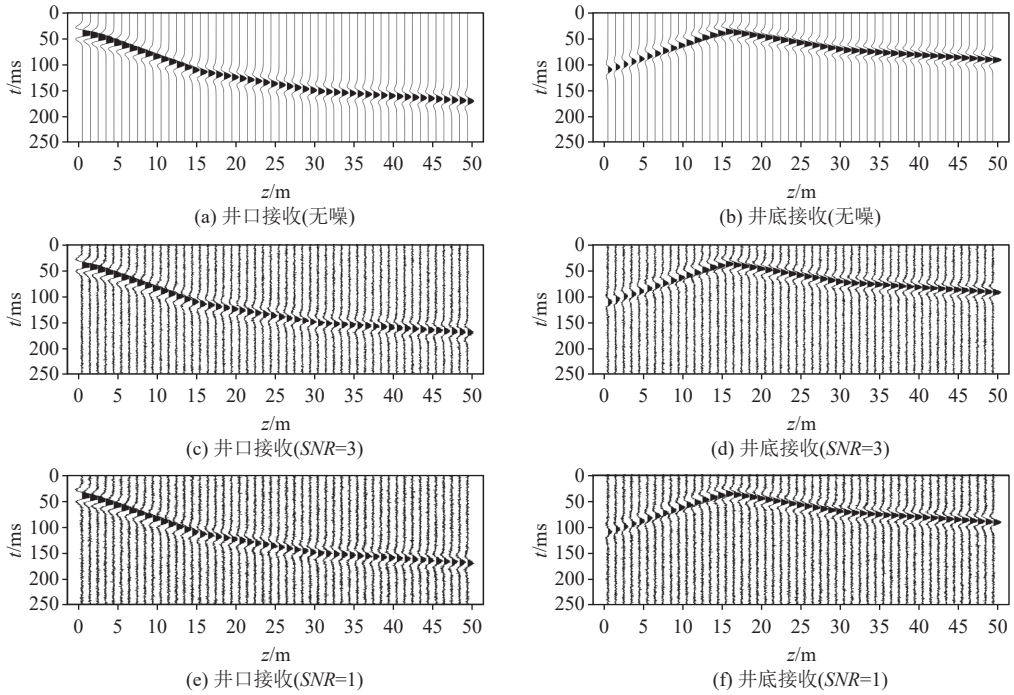


图 2　微测井正演记录

Fig. 2　Micro-logging forward modeling record

图 3 为井口和井底道接收地震记录的频谱。震源激发后，地震波首先传播至接收井井底检波点，再经近地表地层传播至井口检波点。对比可见，在经过近地表的吸收后，地震波振幅谱发生衰减，主频向低频移动，符合地层吸收衰减规律。在此基础上分别使用频谱比法、能量比法和峰值频移法来计算低降速带的 Q 值，反演结果如表 1 所示。

在无噪模型中，采用频谱比法和能量比法求取的近地表品质因子与模型设置的真实 Q 值(Q=10)的相对误差较小，分别为 2.32% 和 2.23%，而峰值频移法求取的 Q 值偏大，相对误差达到了 14.15%。当地震记录中含噪声时，频谱比法受影响最大，对噪声敏感；频移法基本不受影响，反演结果与无噪模型一致；能量比法的结果出现波动，但受噪声影响较小，在强噪声条件下相对误差也并没有超过 5%。

1.2.2　有效频带的影响

频谱比法和能量比法计算时均需要选定一个频带计算范围。频谱比法对计算频带的选择较为敏感。图 4 为无噪和含噪地震记录在不同计算频带选取方案下的频谱比结果。基于频谱比拟合直线的斜率，即可计算获得地层品质因子，再根据不同频带下的 Q 值反演结果及相对误差(表 2)来分析频带选择与 Q 值之间的关系。当地震波振幅谱在有效频带的低频段和高频段出现急速衰减时，如参与计算的频

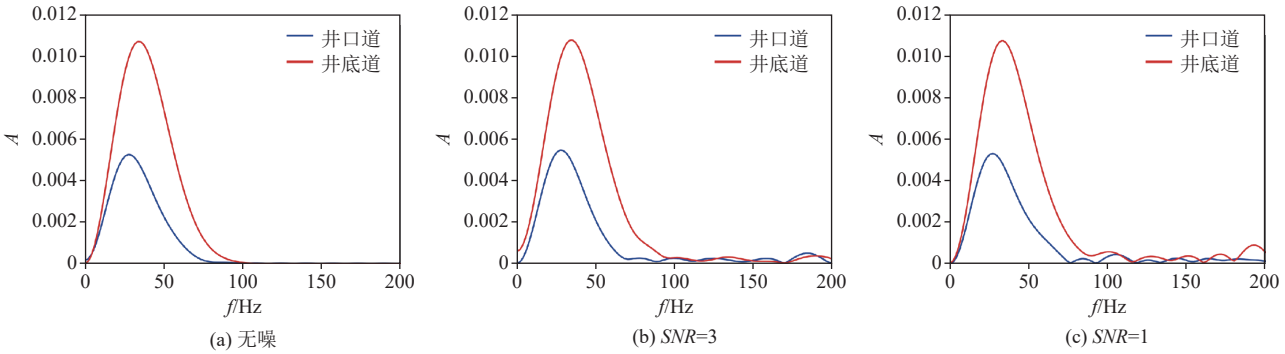


图 3　井口和井底道接收记录的频谱

Fig. 3　Seismogram spectrum of the well head and well bottom

表 1　低降速带 *Q* 值反演结果

Table 1　*Q* inversion results of low deceleration zone

	反演方法	反演*Q*值	绝对误差	相对误差/%
无噪	频谱比法	9.7676	−0.2324	2.32
	能量比法	10.2228	0.2228	2.23
	峰值频移法	11.4147	1.4147	14.15
SNR=3	频谱比法	9.6853	−0.3147	3.15
	能量比法	10.2572	0.2572	2.53
	峰值频移法	11.4147	1.4147	14.15
SNR=1	频谱比法	6.8780	−3.1220	31.22
	能量比法	10.4315	0.4315	4.32
	峰值频移法	11.4147	1.4147	14.15

带包含过多这类衰减显著的部分，会导致反演精度显著下降；尤其在含噪情况下，该部分有效信号能量较弱、信噪比较低，导致反演精度进一步降低。

由此，可总结出如下规律：①若选择以低频为主导的频带，由于低频成分受吸收衰减影响较弱，导致谱比曲线的斜率估计偏差，从而导致反演得到的 *Q* 值偏大；②若选择以高频为主导的频带，则因高频成分衰减剧烈，且信噪比通常较低，反演 *Q* 值往往明显偏小；③若选择全频带计算，虽同时包含高频和低频信息，但是频带不宜过宽，地震信号在非常低的频率能量通常很低，信噪比差，且可能受到低频噪声(如面波) 干扰，而地震信号在高频端能量衰减很快，信噪比急剧下降。应设定一个合理的高频截止点，使反演结果较为稳定、准确，减小误差。

表 3 为能量比法在不同频带选择下的 *Q* 值反演结果。结合图 3 的地震频谱可以看出，当所选计算频带的高截止频率小于有效信号频带的最大频率 (*f*=100 Hz) 时，反演精度随计算频带的增加先提高后下降。这是由于在靠近 100 Hz 处振幅急剧衰减，导致计算结果不稳定，而当所选计算频带的高截止频率超过 100 Hz 后，反演结果不再随计算频带的增加而变化。根据上述分析可得到如下规律：能量比法对频带选择的敏感性较低，受影响程度较小；当频带过窄时，因包含高频信息不足导致反演结果偏小，而

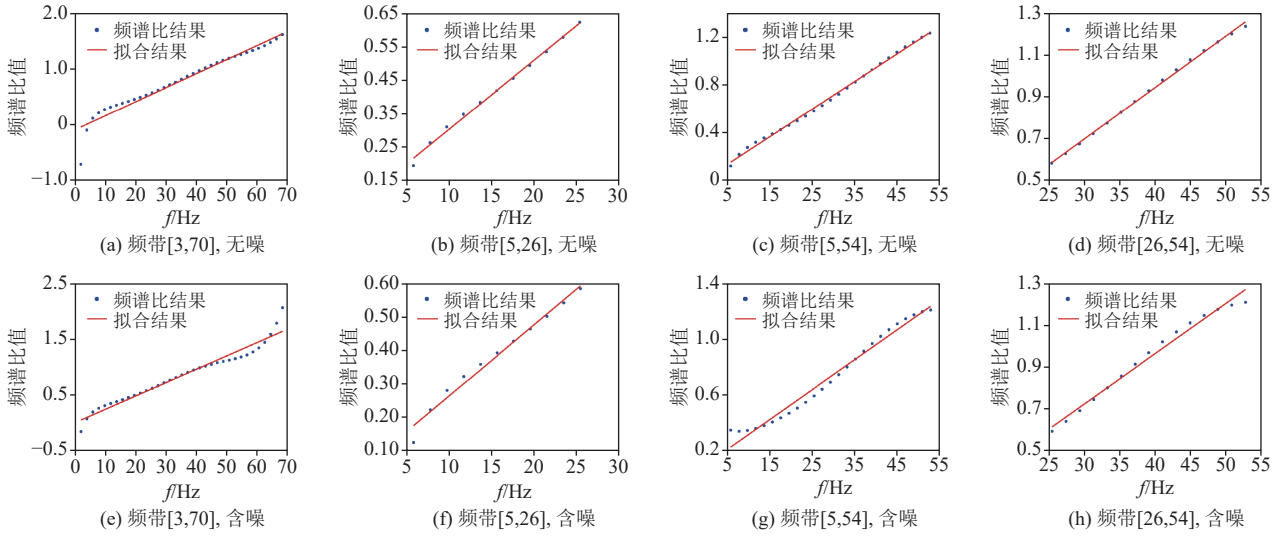


图 4　井口道和井底道频谱比结果

Fig. 4　Spectral ratio of the well head and the well bottom

表 2　频谱比法不同频带的 Q 值反演结果

Table 2　Q inversion results with multi-band spectral-ratio method

	频带	反演Q值	绝对误差	相对误差/%
无噪	[3,70]	9.077 6	−0.922 4	9.22
	[5,26]	10.534 1	0.534 1	5.34
	[5,54]	9.767 6	−0.232 4	2.32
	[26,54]	9.667 1	−0.332 9	3.33
含噪	[3,70]	7.048 7	−2.951 3	29.51
	[5,26]	8.994 3	−1.005 7	10.06
	[5,54]	9.685 3	−0.314 7	3.15
	[26,54]	10.150 0	0.150 0	1.50

表 3　能量比法不同频带的 Q 值反演结果

Table 3　Q inversion results with multi-band energy ratio method

	频带	反演Q值	绝对误差	相对误差/%
无噪	[0,27]	9.776 4	−0.223 6	2.24
	[0,54]	10.222 8	0.222 8	2.23
	[0,100]	10.426 0	0.426 0	4.26
	[0,123]	10.426 1	0.426 1	4.26
含噪	[0,27]	9.755 4	−0.244 6	2.45
	[0,54]	10.257 8	0.257 8	2.23
	[0,100]	10.450 3	0.450 3	4.50
	[0,123]	10.461 5	0.461 5	4.62

频带过宽则可能会引入高频噪声, 反而降低能量比法的反演精度。

1.3　微测井品质因子反演方法优选

三种方法在反演精度上的差异源于方法原理的不同。频移法仅依赖单一峰值频率的偏移信息, 信息利用有限, 且在传播时间较短时, 主频偏移量较小, 容易引入较大误差; 相比之下, 频谱比法和能量比法利用了某一频带范围内的全部振幅信息, 因而在可信度和准确度方面均优于频移法。频谱比法的精度高度依赖于计算频带的选择, 且对噪声敏感,只有准确选取由目的层吸收衰减引起振幅变化的频带, 并对原始数据进行有效去噪, 才能获得高精度的反演结果。能量比法的精度则严重依赖于保幅处理的质量, 在充分补偿几何扩散、透射损失的情况下, 其反演结果也会更可靠。

在实际应用中, 建议优先选用频谱比法或能量比法。如参与计算的两道地震信号频谱重叠程度高、地震资料信噪好, 宜选用频谱比法; 若地震波频谱符合高斯分布形态且表现出明显的能量衰减特征, 且已进行充分的几何扩散补偿等处理, 则可选用能量比法。在地震记录信噪比低、频谱形态严重偏离高斯形态分布且传播距离较大、主频发生显著偏移时, 建议使用峰值频移方法进行 Q 值反演。

2　基于反射波的相对衰减系数反演方法及品质因子场的建立

相较于近地表的强吸收衰减作用, 深部地层对地震信号的吸收效应通常可忽略不计, 且由于低降速带的速度较低, 可假设地层吸收衰减作用仅发生于近地表, 地震波在该区域的传播路径简化为简单的射线路径。

2.1　基于多道频谱比法的相对衰减系数反演

假设炮点处的地震道频谱为$A(f,x)$, 检波器在 x_i 处接收到的地震道频谱差异只与检波点表层的 Q 值和走时有关, 即仅考虑近地表一致性吸收衰减, 对于某频率 f 的地震波就可以表示为

$$A(f,x_i)=MA_0(f,x)\exp\left(-\frac{\pi fh}{vQ}\right);\ i=1,2,\cdots,N。\tag{6}$$

式中: A 为接收子波振幅谱; A_0 为震源子波振幅谱; M 为几何扩散等在整个地震频带内与频率无关的衰减; f 为频率; v 为地层速度; h 为传播路径; N 为炮集中检波点的个数。

取两检波器 x_1 和 x_2 处接收的地震波振幅谱分别进行谱模拟, 对谱模拟的结果进行谱比后取自然对数,得到关于频率的线性函数:

$$\ln\frac{A(f,x_1)}{A(f,x_2)}=\ln\frac{M_1}{M_2}+f\left(\frac{\pi h_2}{v_2Q_2}-\frac{\pi h_1}{v_1Q_1}\right),\tag{7}$$

式中: f 为所选取的频带范围; v_1、v_2 为 x_1 和 x_2 处对应的低速层的地层速度; h_1、h_2 为 x_1 和 x_2 处接收到的地震波的传播路径; Q_1 为参考点 x_1 处的表层实际 Q 值; Q_2 为由直线斜率与 Q_1 计算得到的 x_2 处的表层实际 Q 值, 即所需要反演的地层 Q 值。

多道频谱比法并非直接反演地层的 Q 值。该方法首先基于反射波反演出相对衰减系数, 相对衰减系数(R)的定义为

$$R=\frac{\pi h_2}{v_2Q_2}-\frac{\pi h_1}{v_1Q_1}。\tag{8}$$

随后, 通过引入微测井资料作为约束, 将相对衰减系数转换成该点表层实际 Q 值。

2.2　基于相对衰减系数的品质因子场构建

品质因子场的构建首先需要进行初步表层调查, 获取近地表低降速带的结构信息 (如地层速度、地层厚度等)。利用目标工区的微测井数据求取该井点处各深度的Q_i值和速度v_i, 从而计算出井点处低降速带等效 Q 值为

$$Q = \pi h \Big/ \left(v \sum_{i=1}^{M} \frac{\pi \Delta z}{v_i Q_i} \right), \qquad (9)$$

式中：$M = h/\Delta z$；h为微测井点处低降速带的深度；Δz为微测井采样间隔；v为微测井点上低降速带的平均速度。

图 5 为构建品质因子场的具体流程。在炮集上依次选取同一反射波的同相轴，计算各检波点的相对衰减系数，并以微测井点处的 Q 值作为约束，进而求取各检点的等效 Q 值。在此基础上，根据微测井数据建立的大尺度 Q 值变化趋势，对工区检点的 Q 异常值进行空间校正，最终完成品质因子场的构建。

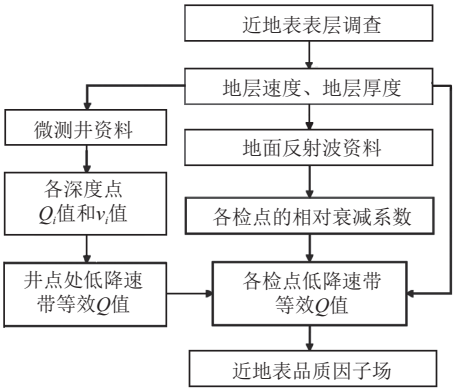


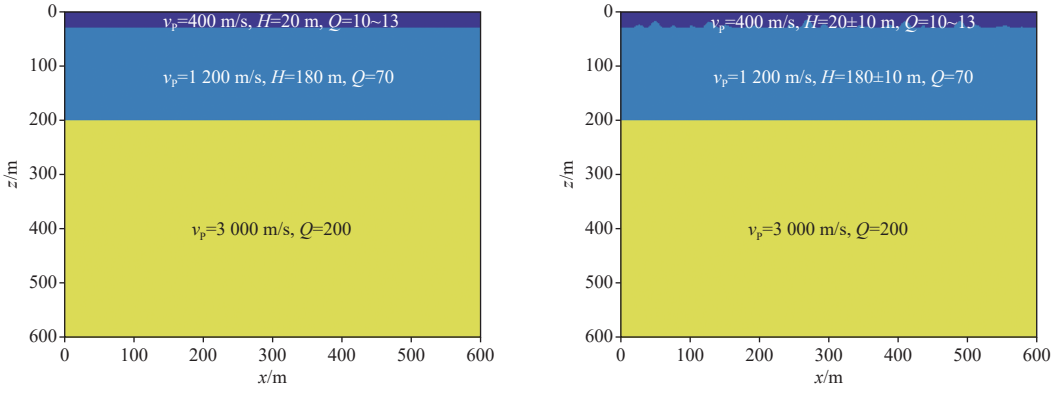
图 5　近地表品质因子场构建流程

Fig. 5　Flowchart for constructing the near-surface quality factor field

2.3　模型测试

设计了 2 个理论模型——低降速带底界面水平模型和低降速带底界面起伏模型，来验证本方法的可行性，模型参数如图 6 所示。采用有限差分方法进行地震记录正演模拟，炮点在 300 m 的位置激发，接收点自 0 m 位置起共布置 300 道，道间距为 2 m，时间采样间隔为 0.1 ms，采样点数为 8 000 个。

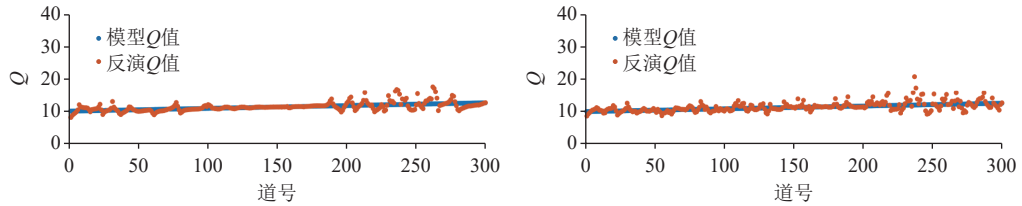
以炮点处地层 Q 值作为已知参考值，在对其他各道地震记录进行谱模拟等预处理的基础上，进行多道频谱比分析。两种模型的反演结果如图 7 所示。从图 7a 中可以看出，尽管在远离参考道的地方存在 Q 值跳变，但是对整体结果进行平滑后，能够发现平滑结果与模型表层 Q 值高度吻合，且在参考道附近的反演结果更加准确。图 7b 显示，受低降速带底界面起伏的影响，反演结果出现明显跳变，其主要原因是所截取的反射波并非完全来自深层界面，还包含了起伏界面的多次反射，并且反射波的传播时间是按照简单的射线路径计算的，从而导致远离炮点位置的反演结果稳定性下降。在对反演结果进行拟合后，其横向变化趋势与模型 Q 值一致，且数值相近。以上模型测试结果证明了本方法可适用于近地表 Q 值反演。



(a) 低降速带底界面水平(模型1)　　(b) 低降速带底界面起伏(模型2)

图 6　模型设置示意

Fig. 6　Diagram of model setting



(a) Q值反演结果(模型1)　　(b) Q值反演结果(模型2)

图 7　多道频谱比法 Q 值反演结果

Fig. 7　Inversion results of Q value using the multi-trace spectral ratio method

3　实际数据应用效果分析

为了进一步验证方案优选策略的可行性及多道频谱比法的实用性, 本节基于微测井实际数据验证 Q 值反演优选策略的可行性, 基于反射波实际数据验证多道频谱比法实现横向 Q 值反演的准确性。

3.1　基于微测井数据的单点 Q 值反演

在实际地震数据中应用频谱比法等主流方法进行 Q 值反演时, 需首先验证观测数据是否满足方法的基本假设, 如不满足则应改用其他适用方法。此外, 受采集过程中多种因素的影响, 实际数据常存在初至时间异常、激发子波不一致等问题, 导致不同地震道之间的频带和能量分布差异显著, 进而影响反演精度。因此, 在实际生产中, 并不存在一种普遍适用的 Q 值反演方法, 而应依据数据的具体特征来选取相应的反演策略, 以提高反演结果的可靠性。

以西北某地的实际微测井数据为例。该工区有多口井, 观测系统如图 8 所示, 激发井井深为 30 m, 接收井井深为 8 m, 接收井距离激发井 20 m。第一炮在 0.5 m 处激发, 0~5 m 段每间隔 0.5 m 激发一次, 5~30 m 段每间隔 1 m 激发一次, 共激发 35 炮。图 9 为其中一口井的部分地震记录。

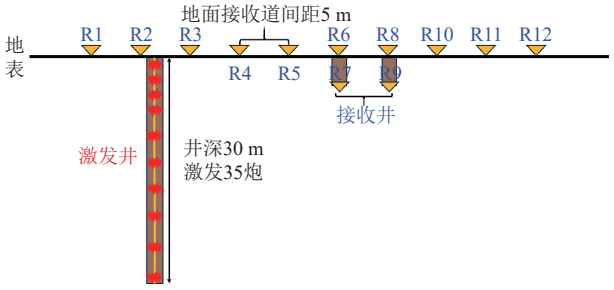


图 8　工区双井微测井观测系统

Fig. 8　Two-well uphole survey design

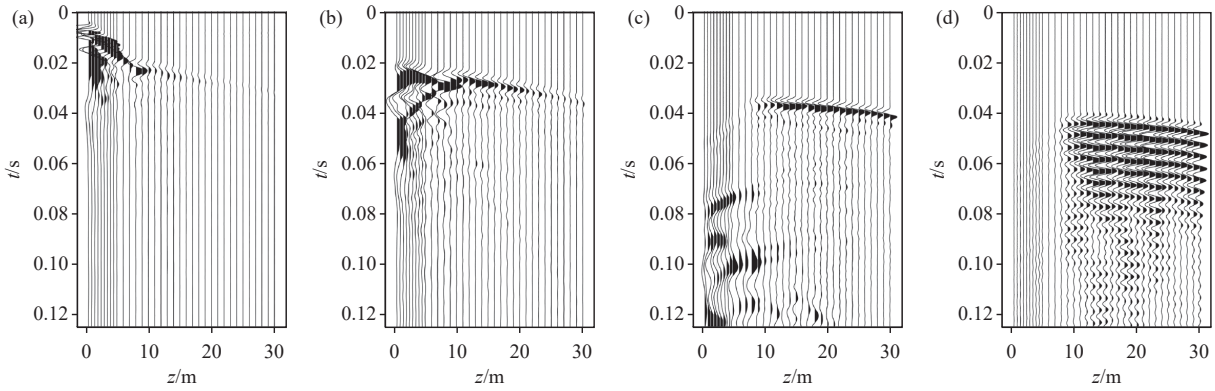


图 9　工区部分微测井记录 (共接收点道集)

Fig. 9　Partial micro-logging data (CRP)

观察实际数据, 优选出第 35 炮的共炮点道集记录进行处理, 然后通过拾取直达波来求取地层的速度, 并据此将近地表分为低降速层和高速层两层。在井口道和井底道的地震记录中选取直达波的同相轴, 开时窗, 再将地震记录从时域转换到频率域, 进行频谱分析。

从图 10 中可以看到主频发生了明显偏移, 这里可以选择峰值频移法来反演 Q 值。尽管振幅谱可以近似看成满足高斯假设, 但由于井口道地震记录频谱的高频成分发生严重衰减, 并且向低频有较大的偏移, 频带重叠程度低, 所以能量比法不太适用于此情形。图 10 还显示在计算频带范围内, 井口和井底的两道记录拥有较多重合部分, 因此也可以使用频谱比法进行 Q 值反演。峰值频移法求取的低降速带等效 Q 值为 10.118 3。

前期表层调查工作显示该区域为沙漠区, 近地表结构松散。这表明反演结果符合实际情况。

高速层的 Q 值是通过从接收井井底检波器接收的共检点记录中选取两炮来进行计算。根据观察数据质量, 选取第 24 炮和第 25 炮作为计算数据, 对记

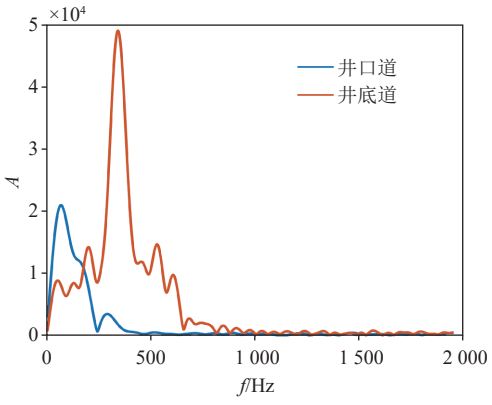


图 10　第 35 炮记录预处理后的频谱

Fig. 10　Seismogram spectrum: preprocessed shot No.35

录开窗截取直达波后将其从时域转换到频率域，观察其振幅谱(图 11)。随着激发深度的增加，传播距离加大，地层的吸收衰减也会逐渐增大，此时可以看到第 25 炮的振幅发生了衰减，但是主频相较于第 24 炮并未发生明显移动，不满足频移法的适用条件；同时在部分高频区域，第 25 炮的振幅也比第 24 炮的振幅大，这使得频谱比法也不太适用。观察到振幅谱的主频偏移不明显，可近似看成符合高斯分布形态，因此，选择能量比法进行高速层 Q 值的计算，得到的高速层 Q 值为 50.973 6。结合此前的表层调查数据，该区域高速层的 Q 值大致在 50~60 之间。

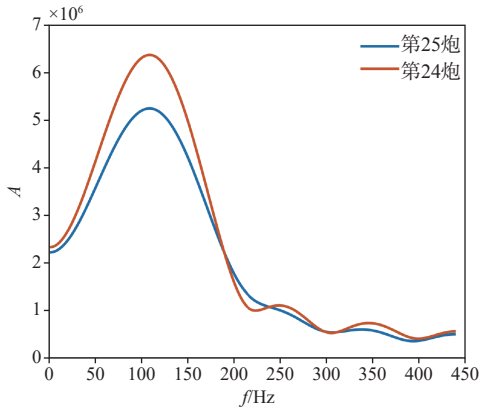


图 11　两炮记录的振幅谱

Fig. 11　Seismogram spectrum of two shot records

3.2　微测井与反射波联合的品质因子场构建

通过优选方案计算出工区中微测井点的等效 Q 值，将其作为使用多道频谱比法计算地层 Q 值时的控制点。在控制点约束的条件下，基于反射波地震记录反演横向 Q 值的相对变化趋势，再通过微测井点的 Q 值进行标定，对反演 Q 值进行校正，最后得到地表横向实际 Q 值。

在实际工区中，微测井数量通常有限，导致大部分区域缺乏井中数据。选取 3.1 节所述工区中的某区域作为研究对象，该区域内共有 4 口微测井资料，地表存在农田、戈壁等多种地形。基于 4 口微测井资料插值得到的品质因子场如图 12 所示，可以看到由于井资料过少，Q 值的横向分辨率很低。

反射波反演得到的各检波点的相对衰减系数如图 13 所示。根据式 (8) 可知，相对衰减系数作为一个中间变量，在将其转换成地表实际 Q 值计算时涉及参考点和检波点处的地层厚度、速度及品质因子等多个参数，其仅能反映检波点 Q 值与参考点 Q 值的相对大小关系，故相对衰减系数可能存在负值。在将相对衰减系数转换成各检波点处的 Q 值时，因参考点和检波点的地层厚度和速度存在差异(该地

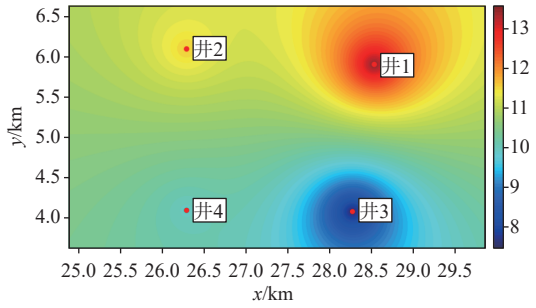


图 12　微测井数据插值构建的品质因子场

Fig. 12　*Q* factor field constructed by interpolating micro-logging data

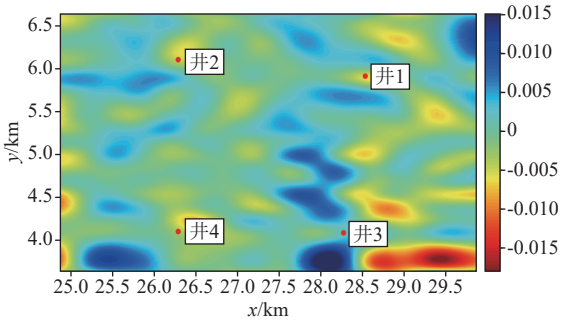


图 13　基于反射波反演的相对衰减系数场

Fig. 13　Relative attenuation coefficient field based on the inversion of reflected waves

区地表起伏较为剧烈)，导致反演得到的检波点 Q 值的变化趋势与相对衰减系数的变化趋势出现部分区域不一致的情况。

基于井地资料联合构建出的品质因子场如图 14 所示，可以看到低降速带 Q 值的细节变化被清晰刻画出来，反演结果在 5~14 之间，且在微测井点附近的反演 Q 值与基于微测井数据计算的 Q 值吻合良好。值得注意的是，图 12 中的 Q 场是基于 Q 值连续变化的假设构建的，由于两井之间距离较远，在井点之间可能出现相较于井点处更高或更低的 Q 值区域。而反射波反演(图 13)的点相对密集，反演结果能反映更多细节，因此，反射波反演结果在井周围区

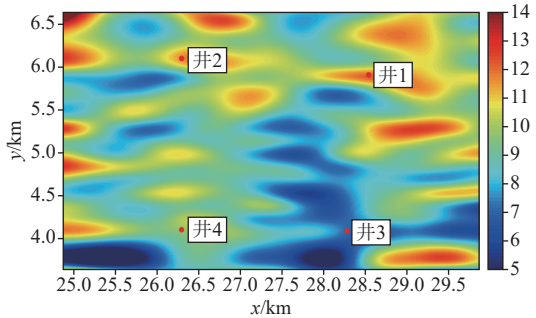


图 14　井地联合构建的近地表品质因子场

Fig. 14　Near-surface quality factor field construction with micro-logging and seismic data

域可能出现如图 14 中的情况: 井点处为高 Q 值, 而其周围则呈现低 Q 值。由于品质因子场是基于相邻道数据的连续性进行反演获得的, 虽提高了反演结果的稳定性, 但会导致其分辨率低于直接由单道记录计算出的相对衰减系数。

3.3　吸收衰减补偿

为进一步验证计算的近地表 Q 值是否准确, 使用 3.2 节中的反演结果对原始地震数据进行反 Q 滤波, 采用考虑信噪比的稳健反 Q 滤波方法, 即在信噪比＜1 的频带不进行补偿, 以避免放大噪声。图 15、图 16 分别为反 Q 滤波前后单炮的地震记录和频谱对比。

图 15 显示, 经过反 Q 滤波处理后, 反射波同相轴变细, 分辨率有所提高。在考虑信噪比的反 Q 滤波过程中, 噪声因为没有被放大, 相对于有效信号而言被压制, 信噪比随之提高。图 16 显示, 地震波在低频和高频区域的振幅均得到了补偿, 主频提升, 频谱得到有效拓宽; 对于 46 Hz 以上的频段, 由于该区域以噪声为主导 (SNR<1), 为防止放大噪声, 未对该部分进行振幅补偿。

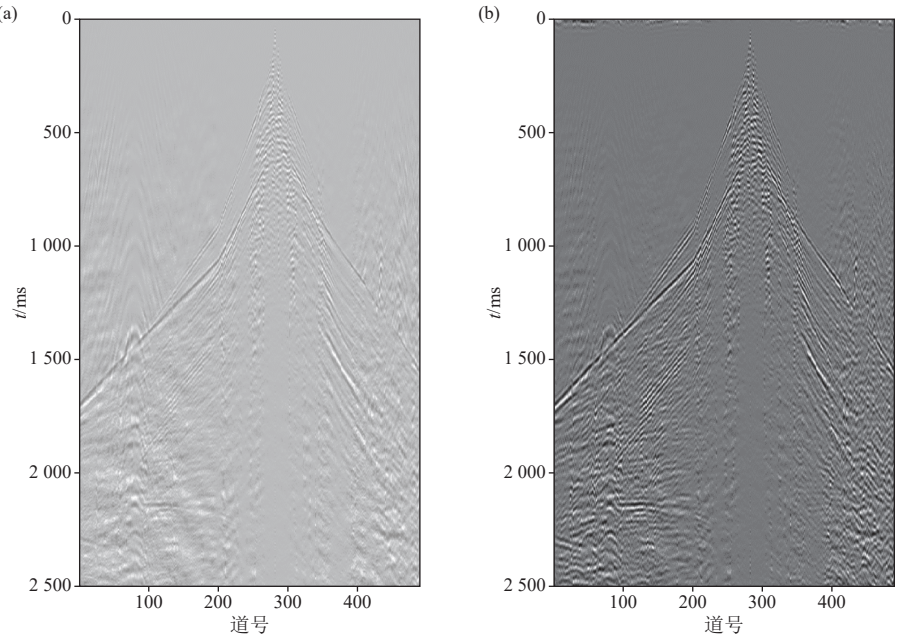


图 15　反 Q 滤波前(a)、后(b)单炮对比

Fig. 15　Comparison of a single shot record before (a) and after (b) inverse Q filtering

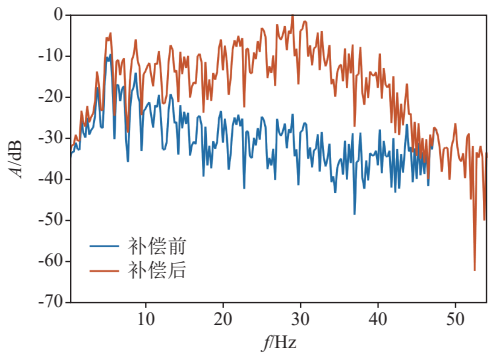


图 16　反 Q 滤波前、后频谱对比

Fig. 16　Comparison of the frequency spectrum before and after inverse Q filtering

4　结论

通过模型与实际数据的处理与分析, 可以得到如下结论:

1) 在实际应用中, 受近地表地下地质条件复杂性、检波器耦合效果不佳及激发岩性不一致等因素影响, 需根据实际数据特征来优选适合的 Q 值反演方法。

2) 同时借助微测井资料的高精度和地面反射波资料的高采样率构建出的品质因子场, 能够精细刻画整个工区的 Q 值变化情况。

3) 在进行反 Q 滤波处理时, 应综合考虑信噪比因素影响, 在低信噪比 (SNR<1) 频带不宜进行补偿, 以避免噪声被放大。

参考文献(References):

[1] 孙成禹. 地震波理论与方法 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2007.
Sun C Y. Theory and methods of seismic waves[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2007.

[2] Wang Y H. A stable and efficient approach of inverse Q filtering[J]. Geophysics, 2002, 67(2): 657−663.

[3] Zhao Y, Liu Y, Li X X, et al. Time-frequency domain SNR estimation and its application in seismic data processing[J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 107: 25−35.

[4] Futterman W I. Dispersive body waves[J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67(13): 5279−5291.

[5] 宫同举. 近地表地震波衰减规律及品质因子提取方法研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.
Gong T J. Study on near surface seismic wave attenuation and methods of quality factor extraction[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.

[6] 云美厚, 聂岩, 李运肖, 等. 地层品质因子的几种定义及相互关系 [J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(5): 816−823.
Yun M H, Nie Y, Li Y X, et al. Definition and mutual relationship of several quality factors[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(5): 816−823.

[7] 赵秋芳, 云美厚, 朱丽波, 等. 近地表 Q 值测试方法研究进展与展望 [J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(6): 1397−1418.
Zhao Q F, Yun M H, Zhu L B, et al. Progress and outlook of near-surface quality factor Q measurement and inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(6): 1397−1418.

[8] Kjartansson E. Constant Q-wave propagation and attenuation[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1979, 84(B9): 4737−4748.

[9] Tonn R. Comparison of seven methods for the computation of Q[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1989, 55(3/4): 259−268.

[10] Tonn R. The determination of the seismic quality factor Q from VSP data: A comparison of different computational methods[J]. Geophysical Prospecting, 1991, 39(1): 1−27.

[11] Engelhard L. Determination of seismic-wave attenuation by complex trace analysis[J]. Geophysical Journal International, 1996, 125(2): 608−622.

[12] 王晓涛, 谭佳, 毛海波, 等. 强衰减条件下能量比法的修正及其应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(1): 42−47.
Wang X T, Tan J, Mao H B, et al. A modified energy ratio method in strong attenuation condition[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(1): 42−47.

[13] Dasgupta R, Clark R A. Estimation of Q from surface seismic reflection data[J]. Geophysics, 1998, 63(6): 2120−2128.

[14] Zhang C J, Ulrych T J. Estimation of quality factors from CMP records[J]. Geophysics, 2002, 67(5): 1542−1547.

[15] Blias E. Accurate interval Q-factor estimation from VSP data[J]. Geophysics, 2012, 77(3): 149−156.

[16] 蔡文涛, 胡光义, 范廷恩, 等. 谱模拟法提取地层品质因子 [J]. 地球物理学进展, 2014, 29(2): 642−649.
Cai W T, Hu G Y, Fan T E, et al. Quality factor extraction by spectral simulation method[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(2): 642−649.

[17] Gurevich B, Pevzner R. How frequency dependency of Q affects spectral ratio estimates[J]. Geophysics, 2015, 80(2): 39−44.

[18] Wang S D, Yang D F, Li J N, et al. Q-factor estimation based on the method of logarithmic spectral area difference[J]. Geophysics, 2015, 80(6): 157−171.

[19] Bath M. Spectral analysis in geophysics[M]. Amsterdam: Elsevier, 1974: 270−282.

[20] 崔庆辉, 王静. 频谱比法求取品质因子的精度分析 [J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2015, 17(1): 40−43.
Cui Q H, Wang J. Accuracy analysis about the spectral ratio method to calculate the quality factor[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2015, 17(1): 40−43.

[21] 巫南克, 周怀来. 谱比法的影响因素研究及应用效果分析 [J]. 物探化探计算技术, 2016, 38(2): 225−231.
Wu N K, Zhou H L. The influence factors of the spectral ratio method and its application effect analysis[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 38(2): 225−231.

[22] Quan Y L, Harris J M. Seismic attenuation tomography using the frequency shift method[J]. Geophysics, 1997, 62(3): 895−905.

[23] 董恩义, 苏海, 高秦, 等. 基于稳定因子的峰值频移 Q 补偿技术在黄土源区的应用 [J]. 河北地质大学学报, 2021, 44(6): 67−72.
Dong E Y, Su H, Gao Q, et al. Application of Q absorption compensation technology based on peak frequency shift method in ordos loess plateall area[J]. Journal of Hebei Geo University, 2021, 44(6): 67−72.

[24] Wang Z J, Cao S Y, Zhang H R, et al. Estimation of quality factors by energy ratio method[J]. Applied Geophysics, 2015, 12(1): 86−92.

[25] 冯玮, 胡天跃, 常丁月, 等. 基于时变子波的品质因子估计 [J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(1): 136−146.
Feng W, Hu T Y, Chang D Y, et al. Quality factor Q estimation based on time-varying wavelet[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(1): 136−146.

[26] 余连勇, 范廷恩, 胡光义, 等. 时间域质心频移法估算品质因子 Q[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2014, 36(4): 55-62.
Yu L Y, Fan T E, Hu G Y, et al. Estimating quality factor Q with time-domain centroid frequency shift method[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2014, 36(4): 55-62.

[27] 张瑾, 王彦国, 王洋, 等. 基于多阶振幅谱面积差的 Q 值估计方法 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2024, 48(5): 59−69.
Zhang J, Wang Y G, Wang Y, et al. Q estimation based on method of amplitude spectral area difference with different order[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2024, 48(5): 59−69.

[28] Chen Y K. Multichannel quality factor Q estimation[J]. Geophysical Journal International, 2019, 218(1): 655−665.

[29] 苏勤, 曾华会, 田彦灿, 等. 表层 Q 值确定性求取与空变补偿方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(5): 988−996.
Su Q, Zeng H H, Tian Y C, et al. Near-surface Q value estimation and quantitative amplitude compensation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(5): 988−996.

Near-surface quality factor field construction with micro-logging and seismic data

DENG Yu-Xuan, SUN Cheng-Yu, LI Jia-Nan

（*School of Geosciences*, *China University of Petroleum* (*East China*), *Qingdao* 266580, *China*）

Abstract: Near-surface layers are typically characterized by loose structures and significant vertical and lateral variations in both thickness and velocity. These characteristics result in marked absorption of seismic wave energy and severe phase distortion, substantially reducing the signal-to-noise ratio (SNR) and resolution of acquired seismic records. The absorption properties of these layers can be described by the quality factor (*Q*-value). Given the complex structures of near-surface layers, constructing a precise quality factor field requires simultaneous consideration of their pronounced vertical and lateral variations. This study first summarized an optimization strategy for quality factor inversion based on data from uphole surveys by analyzing the applicability of common *Q*-value inversion methods. To further enhance the accuracy of near-surface quality factor field modeling, this study proposed a method for constructing precise quality factor field models. This method integrates high-resolution information from uphole survey data with high sampling-rate information from reflection wave data. Tests on real data demonstrate that the proposed method effectively captures detailed variations in lateral *Q*-values of the layers. The compensated seismic waves exhibited broadened effective frequency bands and significantly improved seismic resolution, thereby validating the effectiveness of the presented approach.

Key words: near surface; relative attenuation coefficient; *Q*-value; quality factor field; absorption compensation

（本文编辑: 叶佩, 沈效群）