

doi:10.11720/wtyht.2015.5.31

杨小慧,陆红梅,王荣娟,等.强衰减条件下  $Q$  值修正[J].物探与化探,2015,39(5):1069-1073.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.5.31

Yang X H, Lu H M, Wang R J, et al.  $Q$  modification under the situation of strong attenuation[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(5): 1069-1073.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.5.31

## 强衰减条件下 $Q$ 值修正

杨小慧<sup>1</sup>, 陆红梅<sup>2</sup>, 王荣娟<sup>2</sup>, 马媛媛<sup>3</sup>, 袁殿<sup>3</sup>, 崔震<sup>3</sup>, 何元<sup>3</sup>

(1. 中国石化石油物探技术研究院, 江苏 南京 210014; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国石油大学(北京)地球物理与信息学院, 北京 102249)

**摘要:** 品质因子( $Q$ )是反映地层对地震波吸收衰减强弱的重要参量。在强衰减条件下,常规方法估算(如谱比法等)的品质因子往往比物理定义的品质因子下限( $2\pi$ )还小。通过考察两者差异的来源,给出了两者的换算公式。模型测试表明,当品质因数小于 30 时,常规估算品质因子和物理定义品质因子的相对误差将超过 10%,两者应加以区分,不可混用。根据两种品质因子的特点,有如下建议:当拟合  $Q$ - $V$  经验式时,使用物理定义品质因子;当进行反  $Q$  补偿时,使用常规估算品质因子;当对同一工区的品质因子进行对比时,应换算成同一类品质因子。

**关键词:** 品质因子; 常规估算; 物理定义;  $Q$ - $V$  经验式;  $Q$  值修正

**中图分类号:** P631.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2015)05-1069-05

品质因子  $Q$  是衡量地层介质对地震波吸收衰减强弱的属性参量,在反  $Q$  滤波提高分辨率、流体检测和储层预测等方面有着重要的应用<sup>[1]</sup>。在近地表(尤其是沙漠工区),由于砂层疏松未固结等原因, $Q$  值往往较小;当近地表较厚时(如准噶尔盆地和川西拗陷的低速带和降速带,总厚度可达上百米),表层介质对地震波的吸收衰减是很可观的,甚至可能导致单炮记录的主频只有十几 Hz,大大影响了中深层的成像精度<sup>[2]</sup>。反  $Q$  滤波是补偿吸收衰减、提高地震成像精度的有效手段,从 Hale 最早提出相位校正、振幅补偿的全反  $Q$  滤波方法<sup>[3]</sup>以后,大量学者提出了不同的补偿算法,如对衰减函数作级数展开的全反  $Q$  滤波技术<sup>[4]</sup>、基于波场延拓的全反  $Q$  滤波技术<sup>[5-7]</sup>等,目前应用较多的是稳定反  $Q$  滤波技术<sup>[8]</sup>,如 Wang<sup>[9]</sup>引入稳定性因子,较好地解决了补偿过程中振幅溢出、噪声放大等不稳定问题。表层反  $Q$  滤波的前提是需要相对准确的地表  $Q$  值分布,因此  $Q$  值是近地表结构调查的一个主要对象。

根据品质因子  $Q$  值的物理定义, $Q$  值反比于地震波传播一个波长后的能量损失率,其值在理论上不小于  $2\pi$ 。在实际工作中,人们一般采用地震波谱

方法来估算地层  $Q$  值,如对数谱比法(LSR)<sup>[10-12]</sup>、质心频移法(CFS)<sup>[13]</sup>和属性组合法<sup>[14]</sup>等,取得了较好的应用实效。根据已发表文献,利用上述方法估算的低速带  $Q$  值一般分布在 1~10 之间<sup>[15]</sup>,很多情况下低于理论极小值。理论定义与实际估算之间的这种差异,主要是因为当  $Q$  值较小(即强衰减条件)时,近似估算的假设条件不再成立。王国庆等<sup>[16]</sup>定量分析了这种误差,对实际估算的小  $Q$  值进行了校正,并重新给出了黄土塬、沙漠及平原近地表的真实  $Q$  值分布,使其数值符合物理定义。笔者认为,这种定量校正统一了实际估算与物理定义得到的  $Q$  值,使人们对于  $Q$  值分布有更清晰的认识,具有较好的理论意义和实用价值。

这里,在文献[16]的基础上,对  $Q$  值修正进行更深入的定量分析,通过换算公式实现理论定义和实际估算之间  $Q$  值的转换,并指出了当实际估算  $Q$  值小于 30 时,这种换算是必要的,理清两者的概念和适用范围,对于实际应用具有一定的指导意义。

### 1 基本原理

记初始子波谱为  $A_1(f)$ ,经地层传播距离  $s$  后,衰减为  $A_2(f)$ ,两者关系满足

$$A_2(f) = A_1(f)e^{-\alpha(f)s}, \quad (1)$$

式中  $\alpha(f)$  是与频率  $f$  有关的地层吸收系数。在地震频段范围内,该变量与频率呈近似正比关系,因此式(1)可改写为

$$A_2(f) = A_1(f)e^{-\gamma ft} = A_1(f)e^{-(\pi ft)/(\gamma v)}, \quad (2)$$

其中:  $\gamma$  是与对数衰减量有关的常量,  $v$  是地层速度,  $t$  为传播  $s$  的时间,  $Q_R = \frac{\pi}{\gamma v} = \frac{\pi f}{\alpha(f)v}$ 。需要说明的是,

式(2)是对式(1)的变形改写,不存在数学上的近似处理,一般地,  $Q$  值估算和反  $Q$  滤波中的振幅补偿算法都是基于式(2)进行推导。根据实际地震资料,利用常规  $Q$  值估算方法(如谱比法、质心频移法等)估算得到的品质因子即为  $Q_R$ 。

根据地层品质因子的物理定义,有

$$Q_p = 2\pi E / \Delta E, \quad (3)$$

式中:  $Q_p$  为物理定义品质因子,  $E$  为初始子波的能量,  $\Delta E$  为子波传播 1 个波长后衰减的能量。联合式(2)和式(3),可得

$$e^{-2\pi/Q_R} = 1 - 2\pi/Q_p. \quad (4)$$

式(4)将  $Q_R$  和  $Q_p$  联系起来,使得两者的异同更加明显。当式(4)中的指数项按 Taylor 一阶级数展开时,则  $Q_p \approx Q_R$ , 即物理定义的品质因子与常规估算的品质因子近似相等。Taylor 展开的数学近似条件是  $e^{-x}(x>0)$  的指数  $x$  为一小量,  $x$  值越大,误差越大;相应地,式(4)中的  $2\pi/Q_R$  越大(即  $Q_R$  越小),一阶展开误差越大,  $Q_R$  和  $Q_p$  的差异越大,下

面主要通过定量分析来讨论两者的异同。

## 2 模型测试

下面,通过模型测试来说明物理定义的品质因子  $Q_p$  和常规估算的品质因子  $Q_R$  之间的异同。不失一般性,以 50 Hz 主频的 Ricker 子波作为初始地震子波,假设其在一足够厚的常  $Q$  介质中传播一个周期(约为 20 ms),衰减方式见式(2),通过总能量的衰减率来考察  $Q_p$  和  $Q_R$  的差异。

第一种情况:取  $Q_R = 100$ ,图 1 展示了衰减前后的波形及频谱。从波形上看,子波主能量略有降低,峰值从 3 503 减为 3 382;从频谱上看,主频由 50.0 Hz 下降为 49.5 Hz。数值计算得到衰减后总能量的衰减率( $\Delta E/E$ )约为 0.064 4,按式(3)换算得  $Q_p$  为 97.50,与  $Q_R$  的相对误差为 2.50%。此时,常规估算的  $Q_R$ (例如用谱比法估算)和物理定义的  $Q_p$  之间可以互通,不作区分。

第二种情况:取  $Q_R = 10$ ,图 2 展示了衰减前后的波形及频谱。子波峰值从 3 503 衰减为 2 485,主频由 50.0 Hz 衰减为 46.5 Hz,这相当于初始子波能分辨 5 ms(四分之一波长)的薄层,衰减子波只能分辨 5.37 ms 的薄层,波形分辨率降低了近 7.5%。数值计算的衰减后总能量的衰减率( $\Delta E/E$ )约为 0.475 7,按式(3)换算得  $Q_p$  为 13.21,与  $Q_R$  的相对误差为 32.10%。此时,常规估算的  $Q_R$  和物理定义的  $Q_p$  之间互通性较差,应区别对待。

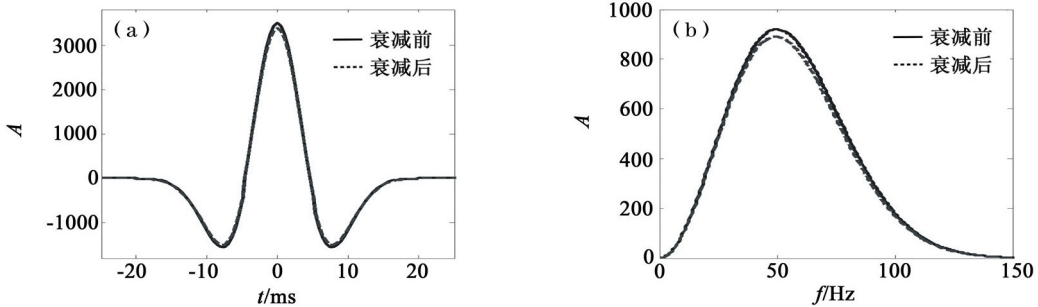


图 1  $Q=100$  衰减前后的波形(a)及频谱(b)

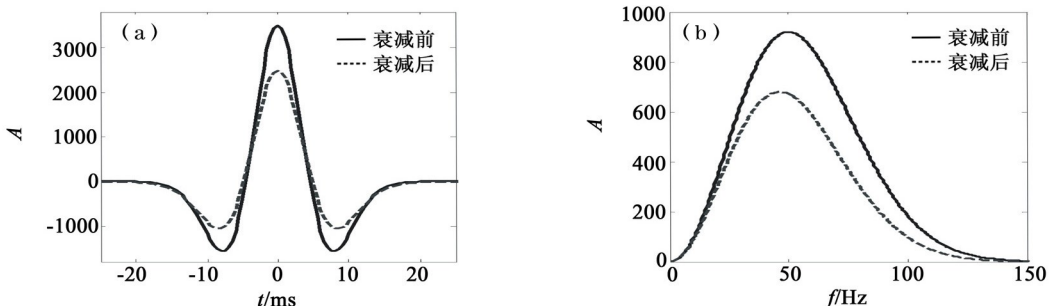


图 2  $Q=10$  衰减前后的波形(a)及频谱(b)

实际上,根据式(4)可以实现  $Q_R$  和  $Q_p$  之间的数值换算,例如,当利用常规方法估算得到一组  $Q_R$  值,可以通过该式换算得到符合物理定义的  $Q_p$  值,便于与实验室物理模型数据进行对比;反之,亦然。图 3a 展示了  $Q_R$  和  $Q_p$  之间的关系曲线,其中,横轴为  $Q_R$  值(从 1 渐变到 50),纵轴为  $Q_p$ ;图 3b 为两者的相对误差曲线,即  $\frac{|Q_R-Q_p|}{Q_p} \times 100\%$ 。图 3a 表明,

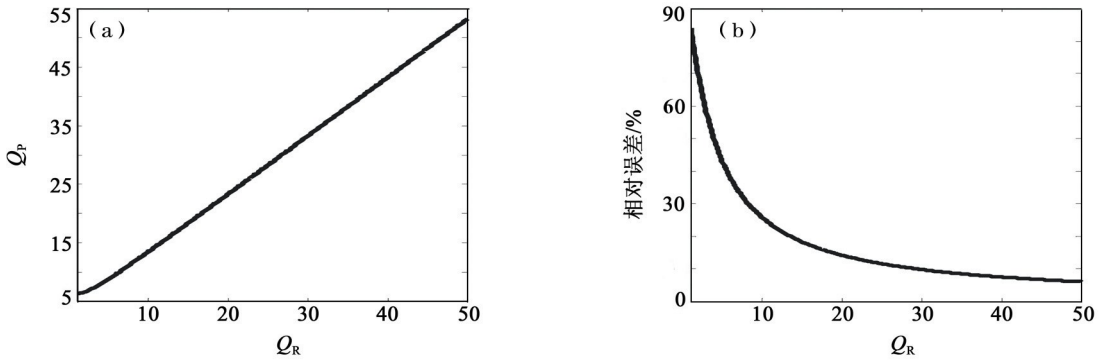


图 3  $Q_R$  和  $Q_p$  关系 (a) 及其相对误差 (b)

### 3 $Q$ 值修正

在实际生产中,人们主要按照式(2)来估算品质因子(如对数谱比法等),这时得到的应该是  $Q_R$ 。在近地表调查中, $Q_R$  一般小于 20,不能近似地看作是具有物理意义的品质因子  $Q_p$ 。因此,需要利用式(4)对强衰减条件下的小  $Q$  值进行修正,这样做是为了便于与实验室物理模型数据进行比对或用作其他用途。下面摘录几组地区的地质小  $Q$  值进行修正,作为示例。

表 1 是濮城地层结构调查结果<sup>[17]</sup>,第 2~4 列给出了前 4 层的厚度、速度和  $Q$  值等信息(这里的  $Q$  值即本文的  $Q_R$ );第 5 列是根据式(4)转换得到的

随着  $Q_R$  的增加, $Q_p$  也相应增加,但两者数值存在一定的差异。例如,当  $Q_R = 8$  时, $Q_p = 11.55$ ;当  $Q_R = 40$ , $Q_p = 43.22$ 。图 3b 表明,随着  $Q_R$  的增加,其与  $Q_p$  的相对误差逐渐减小,数值从初始的 84.11% 降为 6.04%,下降速度逐渐趋于平缓。当  $Q_R < 30$  时,其与  $Q_p$  的相对误差大于 10%,笔者认为两者不可混用,应区别对待。

地层  $Q_p$ 。可以看到,实际估算的浅地表品质因数为 1.48 和 4.55,经等价换算后得到具有物理意义的地质真实品质因数,分别为 6.37 和 8.39,换算前后的差异较为明显;下面 2 层的品质因数换算前后相差不大,可以不作区分。表 2 是大庆工区表层调查结果<sup>[18]</sup>,陆地的品质因数略大于沼泽,从换算结果看,3 层低速带品质因子(小于 30)的换算是非常有必要的,尤其是当  $Q_R < 2\pi$  时。

表 1 濮城地层结构调查

层位	深度/m	平均速度/(m/s)	$Q_R$	$Q_p$
表土	0~2	360	1.48	6.37
砂黏土	2~7	600	4.55	8.39
含水层	7~50	1700	44.99	48.20
$Q$ 下部	50~200	2000	64.33	67.52

表 2 大庆近地表调查

层位	深度/m		速度/(m/s)		$Q_R$		$Q_p$	
	沼泽	陆地	沼泽	陆地	沼泽	陆地	沼泽	陆地
地表低速带	0~2	0~2	285	310	0.88	1.06	6.28	6.30
潜水面以上低速带	2~4	2~6	300	350	0.99	1.41	6.29	6.36
潜水面以下低速带	4~8	6~10	1160	1300	19.40	24.93	22.71	28.20
第一降速带	8~15	10~20	1400	1500	29.34	34.14	32.59	37.38
第二降速带	15~50	20~50	1600	1700	39.37	44.90	42.60	48.11

### 4 $Q$ - $V$ 经验公式

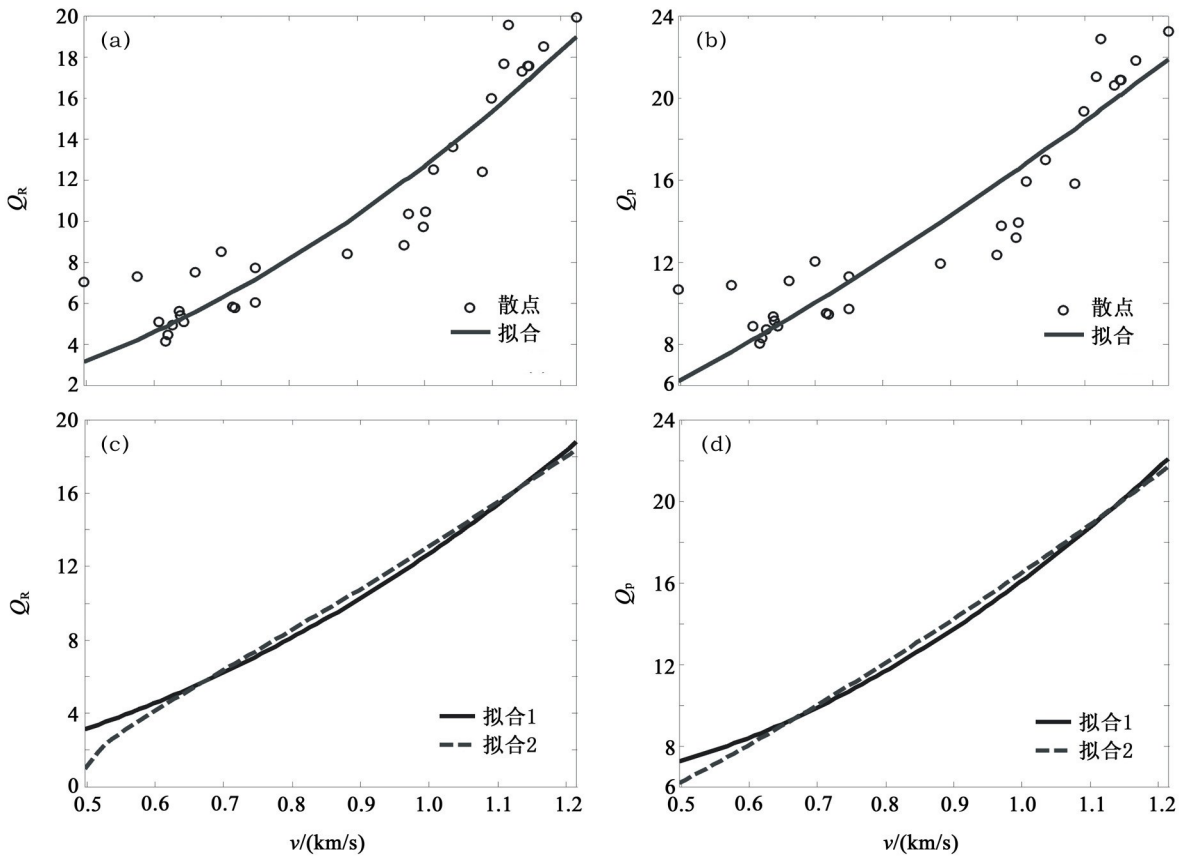
为了适应三维工区的生产需求,人们往往借助  $Q$ - $V$  经验公式来得到地层的三维  $Q$  体,而  $Q$ - $V$  经验式需要通过离散点的拟合来获得。从实际资料中得到的往往是  $Q_R$ ,而我们需要拟合的应该是具有物理

意义的  $Q_p$ - $V$  经验式,因此,在拟合之前进行  $Q_R$ - $Q_p$  的换算是非常有必要的。

结合实例来说明。图 4a 中散点是某工区近地表  $Q_R$ - $V$  分布(品质因子由谱比法估算得到),值域区间为[4, 20],实线是对该分布直接进行拟合,拟合得经验式为  $Q_R = 12.70V^{2.0}$ 。图 4b 中散点是根据

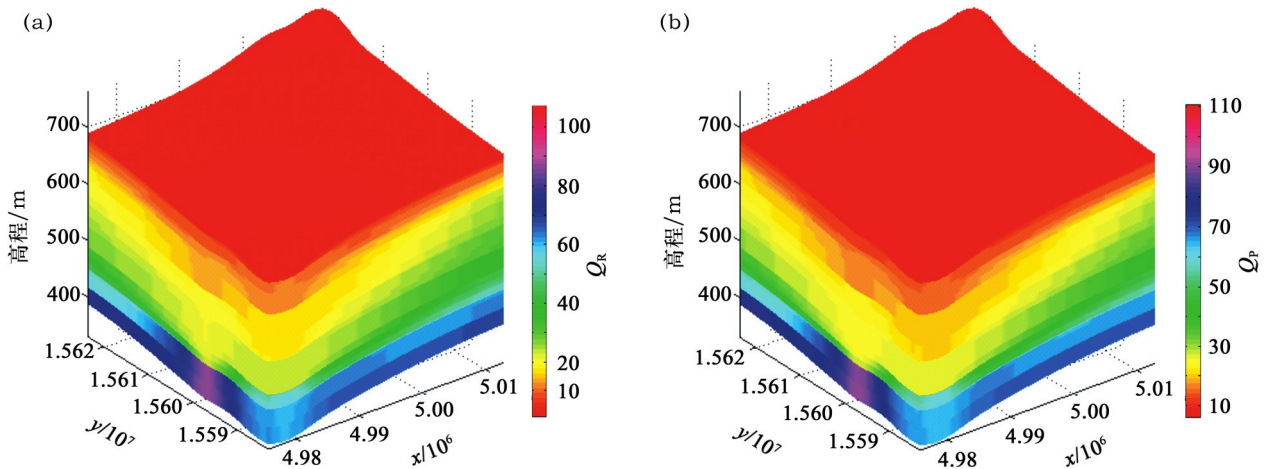
图 4a 中  $Q_R$ - $V$  转换得到的  $Q_p$ - $V$  分布, 值域区间为  $[7.8, 23.8]$ , 实线为拟合曲线, 经验式为  $Q_R = 16.50V^{1.4}$ 。图 4c 和图 4d 展示了两个经验式的差异, 其中, 实线对应图 4a 的拟合式, 虚线对应图 4b 的拟合式。图 4c 图是将品质因子转换为  $Q_R$  进行对比, 图 4d 图是将品质因子转换为  $Q_p$  进行对比, 可以

看到, 虚线和实线的趋势基本一致, 但在局部仍存在一定的差异, 尤其是速度小于 600 m/s 的低速带, 笔者认为第二种拟合方式更具备物理意义。图 5 是工区近地表及浅层的三维  $Q$  体, 其中, 图 5a 为  $Q_R$ , 值域分布区间为  $[1.25, 106.88]$ , 图 5b 为  $Q_p$ , 值域分布区间为  $[6.32, 110.06]$ 。



a— $Q_R$ - $V$  拟合; b— $Q_p$ - $V$  拟合; c— $Q_R$ - $V$  曲线; d— $Q_p$ - $V$  曲线

图 4  $Q$ - $V$  经验式拟合



a—常规估算  $Q_R$ ; b—物理定义  $Q_p$

图 5 近地表及浅层三维  $Q$  体



## 5 结论

常规方法估算的品质因数与物理定义的品质因数存在一定的差异,当值大于 30 时,此时的  $Q_R$  可近似替代  $Q_p$ ;当值小于 30 时,两者的误差将不可忽略,应加以区分。在实际应用中,两者需要区别对待,例如,进行  $Q$ - $V$  经验式拟合时,建议使用  $Q_p$ ,更符合物理定义;进行表层反  $Q$  补偿时,建议使用  $Q_R$ ,因为补偿算法一般根据指数衰减模型实现;进行不同时期、不同资料得到的品质因子对比时,建议换算为同一类品质因子( $Q_R$  或  $Q_p$ )。

## 参考文献:

- [1] 马昭军,刘洋.地震波衰减反演研究综述[J].地球物理学进展,2005,20(4):1074-1082.
- [2] 涂远良,王达远,李华科.川西拗陷地震波衰减定量估算及分析[J].物探与化探,2013,37(4):596-602,632.
- [3] Hale D. An inverse- $Q$  filter[J].Stanford Exploration Project Report,1981,26:231-243.
- [4] Hale D.  $Q$ -adaptive deconvolution[J].Stanford Exploration Project Report,1982,30:133-158.
- [5] Hargreaves N D,Calvert A J. Inverse  $Q$  filtering by Fourier transform[J].Geophysics,1991,56(4):519-52.
- [6] 郭见乐.基于粘滞性声波方程的吸收补偿方法[J].物探与化

- 探,2014,38(3):577-581.
- [7] 郭恺,姜婷婷.双复杂介质条件下的反  $Q$  滤波偏移延拓算子研究[J].物探与化探,2014,38(3):571-576.
- [8] 王珊,于承业,王云专,等.稳定有效的反  $Q$  滤波方法[J].物探与化探,2009,33(6):696-699.
- [9] Wang Y H. A stable and efficient approach to inverse  $Q$  filtering[J].Geophysics,2002,67:657-663.
- [10] Kjartansson E. Constant  $Q$ -wave propagation and attenuation[J].J Geophys Res,1979,84:4737-4748.
- [11] 王慧茹.谱模拟频谱比法反演品质因子稳定性分析[J].物探与化探,2009,33(1):85-87.
- [12] 付勋勋,张君学,陈阵,等.基于  $S$  变换求取地层的品质因子  $Q$ [J].物探与化探,2013,37(1):113-116.
- [13] Quan Y L, Harris J M. Seismic attenuation tomography using the frequency shift method[J].Geophysics,1997,62(3):895-905.
- [14] 赵宁,曹思远,王宗俊,等.频域统计性属性组合提取品质因子  $Q$ [J].石油地球物理勘探,2013,48(4):545-552.
- [15] 罗春喜,程增庆,王永哲,等.地震激发井深与品质因数的关系[J].中国煤田地质,2007,19(2):56-58.
- [16] 王国庆.近地表衰减的模型实验研究[D].北京:中国石油大学(北京),2014:17-19.
- [17] 钱绍瑚,高建华,谷永兴,等.地层吸收衰减模型的制作及补偿方法的研究[J].石油地球物理勘探,1998,33(s1):18-24.
- [18] 付德华.大庆探区近地表地震信号吸收衰减规律研究[D].大庆:大庆石油学院,2008:46-59.

## $Q$ modification under the situation of strong attenuation

YANG Xiao-Hui<sup>1</sup>, LU Hong-Mei<sup>2</sup>, WANG Rong-Juan<sup>2</sup>, MA Yuan-Yuan<sup>3</sup>, YUAN Dian<sup>3</sup>, CUI Zhen<sup>3</sup>, HE Yuan<sup>3</sup>

(1. Geophysical Research Institute, SINOPEC, Nanjing 210014, China; 2. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. School of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249)

**Abstract:** Quality factor ( $Q$ ) is a key parameter for geophysical exploration in that it indicates the magnitude of sediment attenuation. When attenuation is large, quality factor computed by conventional methods such as spectral ratio method is smaller than  $2\pi$ , which is the low limit of  $Q$  calculated by defining expression. Conversion formula for the two quality factors is introduced by investigating the differences between them. Model tests indicate that, when quality factor is lower than 30, relative error between quality factors calculated by two methods is larger than 10% so that they should be distinguished one from another. Based on this study, the authors put forward some advises. First, during  $Q$ - $V$  fitting process, it is prefer to use the quality factors calculated by defining expression. Second, conventional method is preferred in gaining quality factors in reverse  $Q$  compensation process. Third, when the comparison of quality factors is needed in an oil field, quality factors should be converted to the same class before the comparison.

**Key words:** quality factor; conventional estimate method; physical defining expression;  $Q$ - $V$  empirical formula;  $Q$  modification

**作者简介:** 杨小慧(1987-),女,江苏如皋人,助理工程师,主要从事地震资料处理方法研究工作。E-mail: yangxiaohui7208@163.com