

引用格式: 张浩, 付昌, 满红霞, 等, 2022. 地震反射数据 Q 值估计及其在油气勘探中的应用 [J]. 地质力学学报, 28 (4): 550-560. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021154

Citation: ZHANG H, FU C, MAN H X, et al., 2022. Q estimation of seismic reflection data and its application in oil and gas exploration [J]. Journal of Geomechanics, 28 (4): 550-560. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021154

地震反射数据 Q 值估计及其在油气勘探中的应用

张浩^{1,2,3}, 付昌⁴, 满红霞⁵, 陈程^{1,2,3}, 方欣欣^{1,2,3}, 李宗星^{1,2,3}

ZHANG Hao^{1,2,3}, FU Chang⁴, MAN Hongxia⁵, CHEN Cheng^{1,2,3}, FANG Xinxin^{1,2,3}, LI Zongxing^{1,2,3}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081;
3. 中国地质调查局油气地质力学重点实验室, 北京 100081;
4. 中国石油集团东方地球物理公司辽河物探处, 辽宁 盘锦 124010;
5. 中国石油集团东方地球物理公司研究院资料处理中心, 河北 涿州 072750

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Key Laboratory of Paleomagnetism & Tectonic Reconstruct, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
3. *Key Laboratory of Petroleum Geomechanics, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*
4. *BGP Liaohe division, Panjin 124010, Liaoning, China;*
5. *Data Processing Center of Geophysical Research Institute, BGP, Zhuozhou 072750, Hebei, China*

Q estimation of seismic reflection data and its application in oil and gas exploration

Abstract: In oil and gas seismic exploration, when the seismic wave propagates in the earth medium, it will encounter obvious absorption and attenuation, resulting in the main frequency of the seismic signal shifting to the low-frequency end. The frequency band narrows and the phase is distorted, which restricts the resolution of seismic exploration to identify thin layers. To obtain a seismic image with higher resolution, this paper introduces a method with effective Q estimation in the imaging domain of seismic reflection data and uses the estimated Q -value to compensate for the attenuation effect through migration to achieve high-resolution imaging. This method introduces the concept of effective Q -value into the time domain. In the time window of the initial viscoelastic time migration image, the effective Q parameters in the time domain are determined through the compensation effect of the data in the time window. Then, the time-depth conversion function is obtained by calculating the imaging ray in the layer velocity in the depth domain, and then the time-depth conversion is carried out for the Q parameters converted to the layer Q -value in the time domain. At last, the key parameter is used as the input of viscoelastic prestack depth migration for viscoelastic compensation imaging of complex structures. Finally, this paper uses the real seismic data from eastern China to verify the effectiveness of the method. The final results show that the process and method developed in this paper can better realize the Q -value modeling and imaging domain compensation in the depth domain, and realize the high-resolution imaging of complex structures.

Keywords: Viscoelastic media; Q ; Attenuation compensation; Time-depth conversion; High resolution imaging

摘要: 油气地震勘探中, 地震波在实际介质中传播时会产生明显的吸收衰减现象, 导致地震信号中的主频向低频移动, 频带宽度变窄, 相位发生畸变, 制约了地震勘探识别薄层的分辨能力。为了获得更高分辨率的地震成像, 文章介绍了一种在地震反射数据成像域进行 Q 值估计建模的方法与流程, 并利用估计

基金项目: 中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务项目 (DZLXJK202006); 国家自然科学基金 (41804129)

This research is financially supported by the Chinese Academy of Geological Sciences (Grant DZLXJK202006) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41804129)

第一作者简介: 张浩 (1983—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为地震成像与智能数据处理应用。E-mail: zhhao@cags.ac.cn

收稿日期: 2021-07-27; **修回日期:** 2022-02-24; **责任编辑:** 范二平

出的 Q 值通过偏移成像对数据进行衰减补偿,实现高分辨率成像。该方法在时间域引入等效 Q 值的概念,首先在初步黏弹性时间偏移成像域的时窗内,通过数据在时窗内的补偿效果来确定时间域的等效 Q 值参数,接着通过在深度域层速度上计算成像射线获得时深转换关系,进而对转换到时间域层 Q 值的等效参数进行时深转换,完成最终深度域 Q 值建模,最后将该关键参数作为黏弹性叠前深度偏移的输入,进行复杂构造的黏弹性补偿成像。同时使用中国东部某实际地震数据来验证方法的有效性,验证结果表明发展的流程和方法可较好实现深度域负责构造 Q 值建模和成像域补偿,实现复杂构造高分辨成像。

关键词: 黏弹性介质; Q 值; 吸收衰减补偿; 时深转换; 高分辨率成像

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 04-0550-11

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021154

0 引言

随着中国油气勘探向着深层、超深层进军,油气勘探的地质目标复杂程度日益增加。传统的地震成像方法常常从地下介质是完全弹性体这一假设出发,而真实的地下介质由于几何扩散、反射和透射、层间颗粒散射、地层吸收等因素,常表现为黏弹性介质,这种黏弹性通过品质因子 Q 值这一物理量来定量表征(Kjartansson, 1979; Aki and Richards, 1980)。由于地球介质黏弹性的存在,当地震波在这种介质中传播时,尤其当地震波场遇到含气构造等(吴迅达等, 2021),会产生明显的吸收衰减现象,具体表现为地震信号中的主频向低频移动,频带宽度变窄,相位发生畸变(Zhang et al., 2013; Wang et al., 2015)。地震波场频率成分中的高频成分吸收衰减比低频成分更加严重,在地震剖面上时间方向发生调谐粘连,导致在地震剖面上出现模糊带,薄层分辨能力显著下降,特别是成像剖面上的“亮点”通常和储层砂体中含流体情况相关, Q 值异常引起的振幅衰减可能导致流体识别中的“亮点”模糊不清(张峤和纪飞, 2021),造成储层刻画能力也随之降低(王小杰等, 2011; 赵静等, 2013),对深层复杂构造油气勘探构造识别十分不利(刘葵和赵文津, 2005; 张林炎等, 2011; 曾旭等, 2018; 庞雄奇等, 2020; 谭元隆等, 2021)。

为了补偿这种吸收衰减效应,学术界提出了一系列数据域补偿吸收衰减的处理方法(Hargreaves and Calvert, 1991; Wang, 2002, 2006; Yuan et al., 2016; 王小杰等, 2019),这些方法成功应用于地震资料常规处理流程中,其中最具有代表性的方法是叠前反 Q 滤波(Wang,

2002, 2006),这种方法可以分别补偿黏弹性造成的波场相位畸变和振幅衰减,属于滤波类方法,使用非常灵活。然而,这种方法是建立在均匀水平层状 Q 值模型前提下,对非均匀的 Q 值场,特别是对应气云带的局部 Q 值异常(低 Q 值)不能很好地处理(邹鹏和程玖兵, 2020)。

另一大类有效地补偿吸收衰减方法是结合偏移成像的 Q 值补偿方法,包括基于Kirchhoff偏移框架(Traynin et al., 2008)、基于单程波方程(Mittet et al., 1995; Mittet, 2007; Wang, 2008; Zhang et al., 2013)和双程波方程的方法(Causse and Ursin, 2000; Suh et al., 2012; Fletcher et al., 2012; Yan and Liu, 2013; Zhu et al., 2014),以及结合最小二乘偏移的方法(Dutta and Schuster, 2014; Sun et al., 2016; 李振春等, 2014)。这类方法基于不同类型的黏弹性波动方程,更准确地考虑了地震波在吸收衰减介质中的实际传播情况。通过对相位和振幅的单独控制来补偿衰减损失,恢复传播过程中被衰减的高频分量;并且能够处理局部剧烈变化的 Q 值场,使气云模糊带等变得清晰,从而获得更高的成像分辨率。近年来随着勘探目标的逐渐复杂和计算技术的进步,这类补偿吸收衰减的偏移方法开始逐渐在油气勘探实践里发挥重要作用,显示出对构造复杂、速度也复杂、并伴有局部气云带等含强黏滞性介质地质情况良好的处理能力。

实际应用中由于黏性叠前偏移方法需要给偏移算法提供非均匀的深度域 Q 值场和伴随的深度域速度场这两个参数。深度域速度场的建模方法已经有很多方法来解决,而如何获得包含局部 Q 异常的精细深度域 Q 值场目前还面临巨大的挑战,是黏弹性叠前偏移方法在实际应用中的主要瓶颈所在, Q 值估计问题在勘探地球物理学领域也是目

前的研究热点和难点。

文章简要回顾了 Q 值估计的经典方法, 同时介绍了这一领域最新的研究进展。结合国内目前油气勘探中的实际应用案例, 展示利用等效 Q 值理论和时深转换建立深度域 Q 值场, 并利用该 Q 值场进行补偿吸收衰减实现深度域高分辨率成像的过程。

1 Q 值估计方法介绍

1.1 品质因子 Q 值定义与衡 Q 模型

品质因子 Q 值是地震波在一个周期内振幅能量与传播过程中耗散能量的比值, 它是岩石的一种固有特性, 又称为内摩擦或耗散因数, 可以表示为

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta E}{E} \quad (1)$$

公式中 E 是处于最大应力和应变状态下的介质弹性性能, 而 ΔE 是在谐波激励下每振动一周期的能量耗散。在一般岩石介质或者线性黏性介质中, 应力和应变之间的关系在频率域用以下公式表达

$$\sigma(\omega) = M(\omega)\varepsilon(\omega) \quad (2)$$

其中 ω 为数据的角频率, $\sigma(\omega)$ 为对黏性介质施加的应力; $\varepsilon(\omega)$ 为相应的应变; $M(\omega)$ 为与频率有关的复体积模量, 分别为体积模量的实部与虚部, 于是定义品质因子

$$Q(\omega) = \frac{1}{\tan(\Phi(\omega))} \quad (3)$$

其中 $\Phi(\omega)$ 是 $M(\omega)$ 的应变滞后相位角。由于上式一定满足因果关系, 则 $M(\omega)$ 的实部和虚部必须满足因果条件, 在数学上可以用 Kramers-Kronig 关系进行表达。于是在给定 $Q(\omega)$ 的情况下, $M(\omega)$ 必然唯一存在, 该品质因子的定义可以结合任何衰减和频散定律, 是目前地球物理学界内给出的最好的关于 Q 值的定义 (Aki and Richards, 1980)。

从品质因子 Q 值定义可见, Q 值是随频率变化的物理量。然而, 在油气地震勘探中, 地震波信号通常处于频率变化范围内, 如 1~200 Hz 这一范围, Q 值的变化很小, 因此通常假定这种情况下的品质因子 Q 值与频率无关或者 Q 值随频率弱变化, 这便是衡 Q 模型理论。地震勘探中用于 Q 值估计与补偿一般考虑衡 Q 模型, 即 Q 值不随频率变化。

1.2 传统 Q 值估计方法

1.2.1 谱比法 Q 值估计

由上述 Q 值的定义可以看出, Q 值的变化会引起地震数据中频率的变化, 正是基于这种物理现象, 传统的 Q 值估计方法都是基于频率域的方法。基于衰减 Q 值模型, 获得 Q 值和频率变化的关系, 通过频率变化情况来推测 Q 值的变化, 从而估计 Q 值。谱比法就是该领域最有代表性的有效 Q 值方法, 其原理简单、计算效率高、物理意义明确, 在 30 多年油气勘探地球物理领域广泛应用于生产实践 (高静怀和杨森林, 2007; 曹思远等, 2014), 其计算过程如下。

当考虑地层吸收衰减时, 如果品质因子与频率无关, 即衡 Q 模型。地震波的振幅谱可以表示为

$$B(f, t) = A(t)B(f, t_0)\exp\left(-\frac{\pi ft}{Q}\right) \quad (4)$$

公式中, f 为数据的频率, $B(f, t)$ 是旅行时为 t 时刻的地震波振幅谱, Q 为品质因子, $B(f, t_0)$ 为初始时刻 t_0 的地震波振幅谱, $A(t)$ 表示与频率无关的其他方面的影响。对上式取不同的时间窗口 t_1 和 t_2 , 可以得到两个振幅谱

$$B(f, t_1) = A(t_1)B(f, t_0)\exp\left(-\frac{\pi ft_1}{Q}\right) \quad (5)$$

$$B(f, t_2) = A(t_2)B(f, t_0)\exp\left(-\frac{\pi ft_2}{Q}\right) \quad (6)$$

公式 (6) 除以公式 (5) 得

$$\frac{B(f, t_2)}{B(f, t_1)} = \frac{A(t_2)\exp\left(-\frac{\pi ft_2}{Q}\right)}{A(t_1)\exp\left(-\frac{\pi ft_1}{Q}\right)} \quad (7)$$

公式 (7) 两边取对数, 整理得

$$\ln\left(\frac{B(f, t_2)}{B(f, t_1)}\right) = C - \frac{\pi f(t_2 - t_1)}{Q} \quad (8)$$

因此, C 是常数项, 将 f 和 B 看作未知数。通过在不同时间窗口各个频率求对数比值, 可以得到斜率为 $-\pi\left(\frac{t_2 - t_1}{Q}\right)$ 的一次函数。通过对斜率做线性拟合, 可以求得品质因子 Q 值。

谱比法可以不利用迭代直接进行 Q 值的计算, 对于信噪比较高的情况准确率较高。当数据频率较低或者噪音较大时, 振幅谱对地震子波由于吸收衰减的变化不敏感。因此, 谱比法适用于高信噪比宽

频带数据, 且估计的 Q 值场一般是各项均匀的。

1.2.2 频移法 Q 值估计

质心频移法由 Quan 和 Harris 在 1997 年提出的 (Quan and Harris, 1997), 借用物理学上质心概念定义了频率质心。质心频率考虑了频谱在不同频率处的分布来表征数据的频率特性, 从而减小噪声和频率宽度的影响。

该方法的理论假设是地震波在地层中的传播过程是线性滤波。如果入射波的振幅谱是 $S(f)$, 地层和检波器的响应分别为 $G(f)$ 和 $H(f)$ 。接收点接收到的入射波经地层滤波和仪器响应后的结果, 记为 $R(f)$, 在频率域表现为乘积的形式

$$R(f) = G(f)H(f)S(f) \quad (9)$$

其中, $G(f)$ 是地层响应, 包含几何扩散等, $H(f)$ 则反映了的衰减效应。

考虑入射波的振幅谱 $S(f)$ 和频率方差之间存在如下关系

$$S(f) = \exp\left[-\frac{(f_R - f_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (10)$$

将 α_0 引入到地层响应中, 地层衰减系数 $H(f)$ 可看作是衰减系数沿着传播路径上的积分

$$H(f) = \exp(-f \int_{\text{ray}} \alpha_0 dl) \quad (11)$$

公式中

$$\alpha_0 = \frac{\pi}{\lambda Q} \quad (12)$$

震源信号的质心频率 f_s 为

$$f_s = \frac{\int_0^\infty fS(f) df}{\int_0^\infty S(f) df} \quad (13)$$

震源信号的方差 σ_s^2 为

$$\sigma_s^2 = \frac{\int_0^\infty (f - f_s)^2 S(f) df}{\int_0^\infty S(f) df} \quad (14)$$

接收点信号的质心频率 f_R 为

$$f_R = \frac{\int_0^\infty fR(f) df}{\int_0^\infty R(f) df} \quad (15)$$

接收点信号方差 σ_R^2 为

$$\sigma_R^2 = \frac{\int_0^\infty (f - f_R)^2 R(f) df}{\int_0^\infty R(f) df} \quad (16)$$

子波的质心频率和方差、衰减系数的关系为

$$f_R = f_s - \sigma_s^2 \int_{\text{ray}} \alpha_0 dl \quad (17)$$

$G(f)$ 与频率 f 、震源质心频率 f_s , 接收点质心频率 f_R 、震源方差 σ_s 和接收点方差 σ_R 等无关, 因此

$$\int_{\text{ray}} \alpha_0 dl = (f_s - f_R) / \sigma_s^2 \quad (18)$$

对于零偏移距地震记录看, 对传播路径的积分可以看作对深度的积分, 上式 (18) 简化为

$$\alpha_{0i} = \frac{\Delta f_i}{\sigma_i^2 \Delta z_i} \quad (19)$$

公式中, $\Delta f_i = f_i - f_{i-1}$ 为不同深度接收点的质心频率之差, Δz_i 为不同深度接收点间距离, α_{0i} 为两个接收点间平均衰减系数, σ_i^2 为第 i 个接收点信号的方差, Δt_i 为不同深度的时间域层厚度。可得到品质因子的表达式

$$Q = \frac{\pi \sigma_i^2 \Delta t_i}{\Delta f_i} \quad (20)$$

2 基于偏移成像的 Q 值估计方法

2.1 等效 Q 值与 Q 补偿偏移成像

对频率域地震数据 $F(\omega)$, 三维 Q 补偿时间偏移的脉冲响应可表达为

$$I_m(x, y, T) = \left(\frac{\tau_s}{\tau_g}\right)^2 \int F(\omega) \omega \exp\left(-j\frac{\pi}{2}\right) \exp\left\{j\omega(\tau_s + \tau_g)\left(1 - \frac{\ln(\omega/\omega_0)}{\pi Q_{\text{eff}}}\right)\right\} \exp\left\{\frac{\omega}{2Q_{\text{eff}}}(\tau_s + \tau_g)\right\} d\omega \quad (21)$$

公式中 ω 是数据的角频率, ω_0 是数据的主频, $F(\omega)$ 是时间域数据 $f(t)$ 的傅立叶变换, τ_s 和 τ_g 是由均方根速度 V_{rms} 求得的炮点 (x_s, y_s) 和接收点 (x_g, y_g) 到成像点 (x, y, T) 的旅行时。

$$\tau_s = T \sqrt{1 + \frac{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2}{(V_{\text{rms}} T)^2}},$$

$$\tau_g = T \sqrt{1 + \frac{(x - x_g)^2 + (y - y_g)^2}{(V_{\text{rms}} T)^2}} \quad (22)$$

Q_{eff} 就是等效 Q 值, 与均方根速度 V_{rms} 类似, 它是表征上覆地层各个不同 Q 值影响的一个等效参数, 假设介质为 n 层层状介质, 等效 Q 值和均方根速度可表达为

$$\frac{1}{Q_{\text{eff}}} = \frac{1}{T} \sum_{l=1}^n \frac{\Delta T_l}{Q_l}, \quad V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{l=1}^n v_l^2 \Delta T_l} \quad (23)$$

公式(23)中 Q_l 和 v_l 为上覆各层介质的 Q 值和速度, ΔT_l 是各层介质的垂直旅行时厚度。

公式(21)表明,对空间中一点进行成像,成像结果仅与该成像点处的等效参数 V_{rms} 和 Q_{eff} 有关。这些等效参数彼此解耦,仅对成像位置处的成像结果产生影响。因此,通过扫描方法来确定这些参数是可行的。扫描法通过令该空间位置上的等效 Q 值为一系列可能的值,对比不同数值产生的吸收衰减补偿效果(高频恢复情况),确定一个该位置处最合适的等效 Q 值。等效参数的使用,极大地简化了建模难度,解决了黏弹性叠前深度偏移面临的 Q 值建模的瓶颈。补偿吸收衰减偏移方法会带来高频端的噪音问题,可通过给定补偿阈值和补偿高截频来控制高频端的不稳定性。

2.2 成像域地震反射数据等效 Q 值估计

在利用成像域地震反射数据拾取 Q 值的过程中,必须要克服薄层调谐所带来的不利干扰。薄层调谐会强烈地改变主波的频谱并导致陷频的产生。如果直接把频谱带入现有的方法中,比如谱比法、频移法,就会得出错误的 Q 值(刘国昌和李超,2020)。消除薄层调谐效应在 Q 值估计中十分重要。等效 Q 值估计通常采用如下的处理流程:①进行常 Q 偏移得到成像域地震数据(吴娟等,2015);②选取同相轴,把与反射轴相关的短时窗道集由时间-偏移距域转换为时间-角度域;③对短时窗道集内的每一道进行傅里叶变换,可以得到这两个反射轴频率-角度域的展开式

$$E(\omega, \theta, T_1) = r(\theta, T_1) S(\omega) \exp \left\{ -\frac{\omega T_1}{2} \left(\frac{1}{Q(T_1)} - \frac{1}{Q_i} \right) \right\} \times \exp \left\{ j \frac{\omega T_1}{\pi} \ln(\omega/\omega_0) \left(\frac{1}{Q(T_1)} - \frac{1}{Q_i} \right) \right\} \quad (24)$$

$$E(\omega, \theta, T_2) = r(\theta, T_2) S(\omega) j \sin(\omega \Delta T / \cos \theta) \times \exp \left\{ -\frac{\omega T_2}{2} \left(\frac{1}{Q(T_2)} - \frac{1}{Q_i} \right) \right\} \times \exp \left\{ j \frac{\omega T_2}{\pi} \ln(\omega/\omega_0) \left(\frac{1}{Q(T_2)} - \frac{1}{Q_i} \right) \right\} \quad (25)$$

其中, T_1 、 T_2 是地震剖面中两个反射轴的时间深度; ΔT 是地震波穿过薄层的垂直单程走时; $Q(T)$ 即代表了非均匀 Q 值下的等效 Q 值模型; Q_i 是层状 Q 值模型; θ 是入射角; $r(\theta, T)$ 是与入射

角、时间深度有关的反射系数; $S(\omega)$ 表示短时窗道集内信号的傅里叶变换;其他变量同上。建立等效 Q 值模型 $Q(T)$,在不牺牲补偿效果的同时,极大简化了层状 Q 值建模的难度。 Q 值模型理论上是随频率变化的,但是在对应的地震数据的频带范围内,如2~200 Hz这个频率范围内, Q 值变化十分微小,可认为是随频率弱变化的。因此,此处的 Q 值在地震数据频率范围内是恒定的,即衡 Q 模型。

3 Q 值估计建模与补偿在油气勘探中的应用

3.1 中国东部某勘探区块等效 Q 值建模

实验数据来自中国东部某勘探区块,该区域有稳定的沉积层,深部有古火山构造。经过时间域常规处理后,偏移成像输入的典型炮集数据如图1所示。

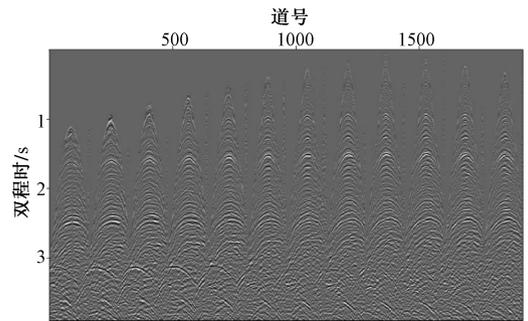


图1 中国东部某工区经常规处理后的地震炮集数据

Fig. 1 Typical shot gathers after conditioning from a survey in Eastern China

文中建模思路将以黏弹性叠前时间偏移(Zhang et al., 2013)和等效 Q 值理论为基础进行发展。将在该方法中建立的时间域等效 Q 值场,通过反演得到迪克斯(Dix)域与成像点一一对应的时深关系,将时间域等效 Q 值场经过处理最终变换到深度域,从而得到深度域非均匀等效 Q 值模型。进而利用深度域速度和该 Q 值场通过叠前深度偏移算法进行补偿吸收衰减的深度域成像,建模流程如图2所示。

数据经时间域处理,深度速度建模后的深度域速度场如图3所示,速度变化范围为2000~6000 m/s。用该深度域速度计算成像射线,将其与速度

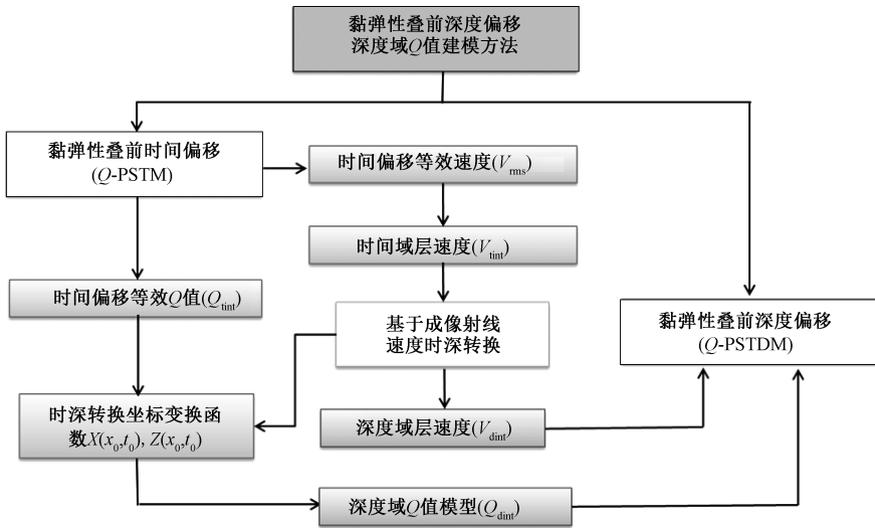


图 2 实际数据偏移与 Q 值建模流程

Fig. 2 Schematic chart of data migration and Q model building workflow

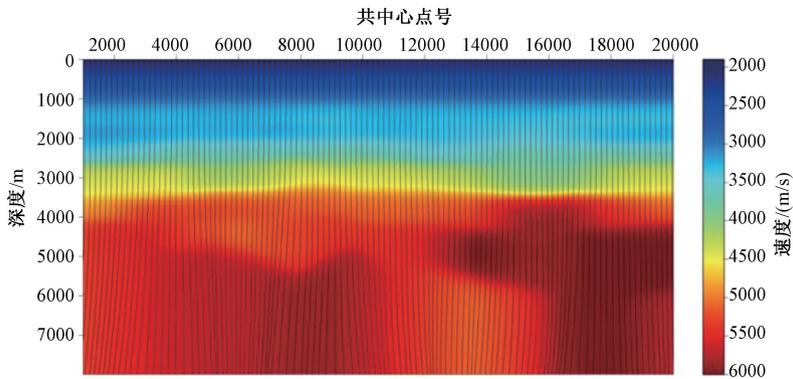


图 3 实际数据深度域层速度与成像射线

Fig. 3 Depth interval velocity and image ray

叠合显示, 可以看出该成像射线覆盖较均匀。该速度参数既是成像的关键参数, 也是深度域 Q 值建模时深关系的来源。通过在计算成像射线的过程中进一步求解射线方程得到时深转换的空间位置变化函数 $X(x_0, t_0)$, $Z(x_0, t_0)$, 如图 4 所示, 即时间域属性, 找到对应的时间域位置坐标 (x_0, t_0) , 即可由这两个变化矩阵转换到深度域, 完成时深转换。

获得时深转换关系后, 下面具体讨论一下被转换的对象, 即初始 Q 值场的变化过程。首先在时间域, 通过叠前数据反 Q 滤波, 确定 Q 值的取值范围。生成若干对应不同 Q 值的 Q 补偿时间偏移成像剖面、针对这些成像剖面, 选取一组确定 Q 值的窗口, 如图 5 所示; 在每个成像剖面上选取 3~6 个近似等间距的 CDP 点, 在每个 CDP 位置, 沿时间深度选取 4~6 个确定 Q 值的二维窗口; 在

每个窗口, 计算不同 Q 值对应的、所有偏移距叠加的成像剖面在该窗口内的叠加频谱, 观察频谱的包络是否存在高频部分随 $1/Q$ 增加而增加的趋势, 若该趋势不明显, 需移动窗口的位置和调整窗口的大小; 最终在每个成像剖面上, 窗口里生成一系列 Q 值获得时间域等效 Q 值, 初始的 Q 值模型是在时间域的窗口内估计得到的, 所以这时在时间域 Q 值只有窗口内局部有值, 因此需要采用插值方法将空间里其他空缺部分的 Q 值插值出来, 在边界附近的点, 则用直接延拓的方法推到边界上。这一拾取过程如图 5 所示。

以上时间域 Q 值拾取过程最终获得了时间域的等效 Q 值 (Q_{eff}), 这一参数是时间域补偿吸收衰减叠前时间偏移的关键参数, 对该实际数据进行分窗口拾取, 最终提取的时间域等效 Q 值如图 6a 所示。进一步从该时间域等效参数出发, 逐

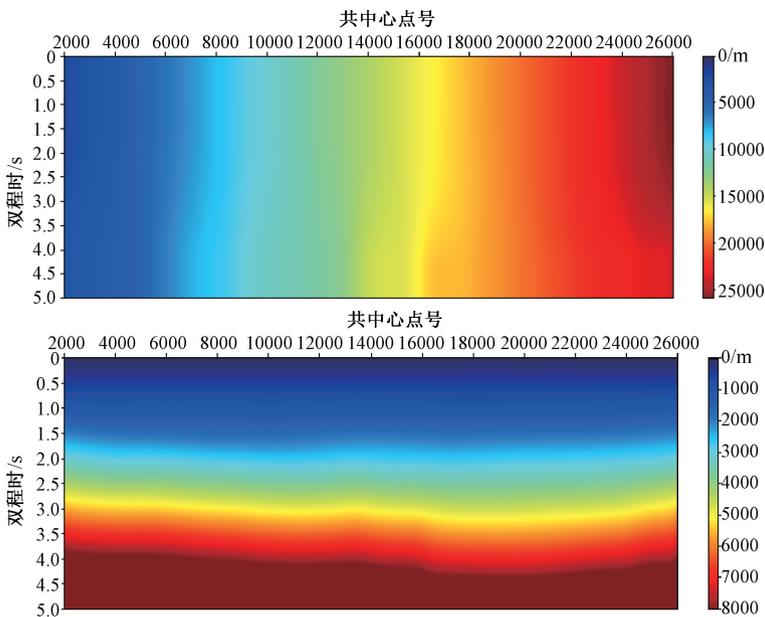
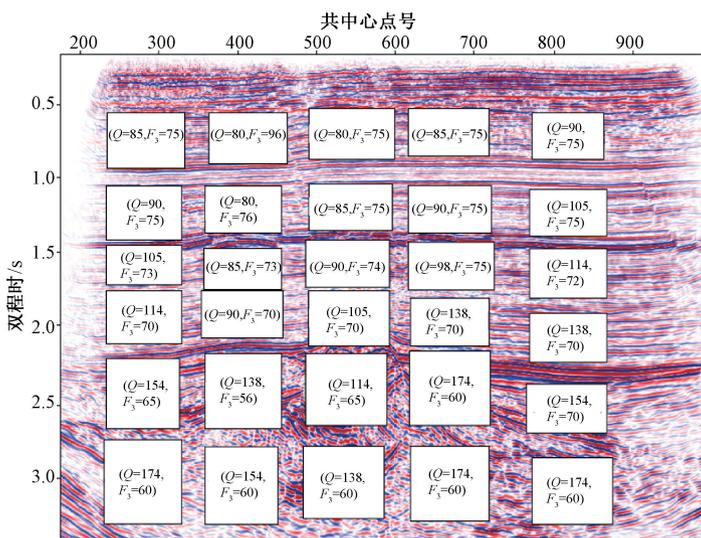


图 4 空间位置转换函数 $X(x_0, t_0)$ 与 $Z(x_0, t_0)$

Fig. 4 Spatial position transformation matrix $X(x_0, t_0)$ and $Z(x_0, t_0)$



F_3 为反 Q 滤波截止频率

图 5 时间域 Q -PSTM 剖面上选取 Q 值过程

Fig. 5 Effective Q picking on Q -PSTM stack in the time domain

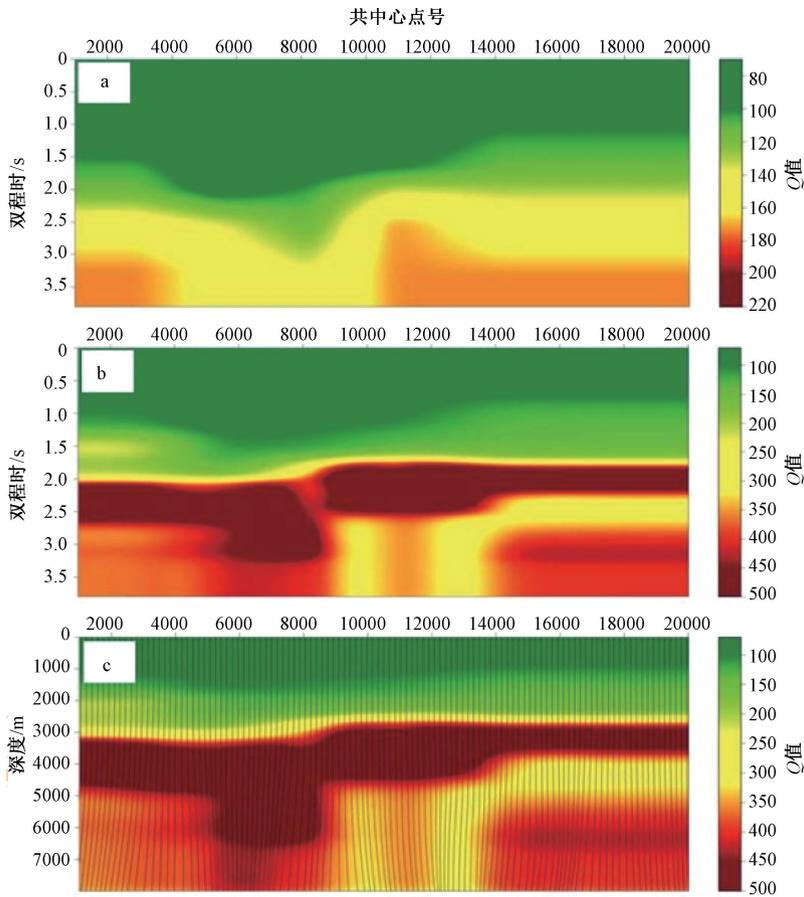
步获得最终的深度域参数。

$$q_i = (T_i - T_{i-1}) / \left(\frac{T_i}{Q_i} - \frac{T_{i-1}}{Q_{i-1}} \right) \quad (26)$$

使用公式 (26) 反演得到时间域层 Q 值 (q_i), 如图 6b 所示, 该 Q 值与时间域构造有一定对应关系, 同时它也是最终成像射线时深转换的输入参数。最终利用图 4 中计算好的空间位置转换矩阵, 作用到图 6b 中所示时间域层 Q 值场, 获得最终深度域层 Q 值场, 完成 Q 值深度域建模 (图 6c)。

3.2 中国东部某勘探区块偏移 Q 补偿实例

有了准确的深度域层速度和较好的深度域层 Q 值场后, 将这两个参数分别做补偿吸收衰减的叠前深度偏移 (Q -PSDM) 和常规叠前深度偏移 (PSDM)。 Q 深度偏移的结果如图 7 所示, 对比该结果和常规深度偏移结果 (图 8) 可以看到, Q 深度偏移结果分辨率比常规的高, 而且相位得到校正, 构造的关系和细节更突出, 火山内幕也更为清晰。为了更清晰地展示结果对比, 选取火山口



a—时间域等效 Q 值; b—经过反演得到的时间域层 Q 值; c—最终转换得到的深度域层 Q 值与对应的成像射线

图 6 Q 值建模过程中的变化情况

Fig. 6 Q model building process

(a) Effective Q in the time domain; (b) Inverted time interval Q value; (c) Final depth interval Q field and image ray

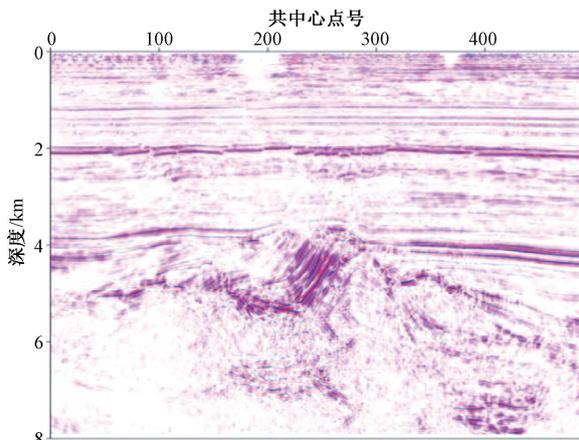


图 7 补偿吸收衰减的 Q 叠前深度偏移成像结果

Fig. 7 Q compensated prestack depth migration result

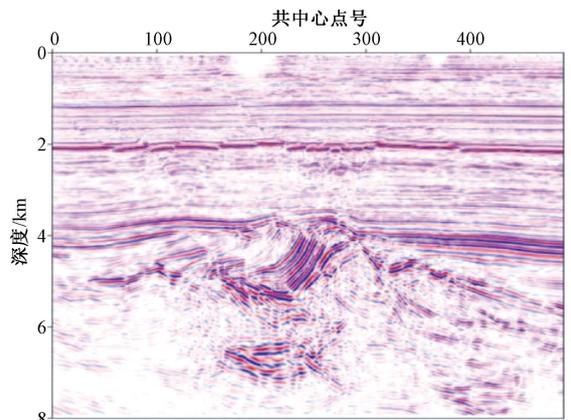
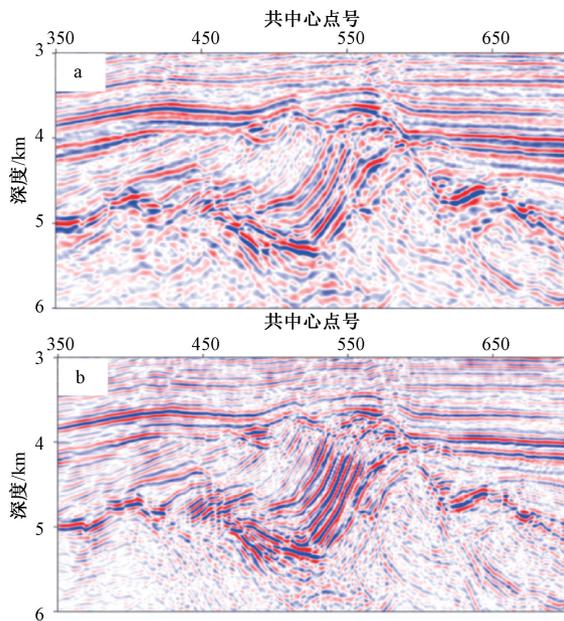


图 8 常规叠前深度偏移成像结果

Fig. 8 Normal prestack depth migration result

区域进行了局部放大对比 (图 9)。同时对窗口内数据进行频谱分析 (图 10), 红色表示常规偏移结果, 蓝色表示 Q 深度偏移结果, 对比显示在 -25 dB 处, 主频提高 15 Hz 左右。

从成像结果和频谱对比, 可以看到 Q 深度偏移在解决了复杂构造成像的同时, 显著提高了成像分辨率, 证明文中发展的这一系列 Q 值估计与建模技术能够提供一个较好的深度域 Q 场。同时, 这里偏移算法中都使用了结合倾角域稳相滤波和



a—常规深度偏移结果；b— Q 深度偏移结果

图 9 未补偿吸收衰减与补偿后的成像结果对比

Fig. 9 Result comparison in detail with and without Q compensation

(a) Normal prestack depth migration result; (b) Q prestack depth migration result

菲涅带最优叠加技术，可以明显看出噪音基本得到了压制，特别是陡倾角构造两翼的高角度偏移噪音。同相轴也变得更连续清晰，整体成像质量有了显著改善。

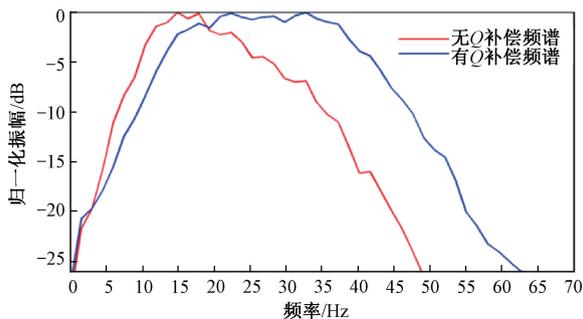


图 10 未补偿吸收衰减与补偿后的成像结果频谱对比

Fig. 10 Spectrum comparison in detail with and without Q compensation

4 结论与展望

黏弹性介质吸收衰减补偿成像，是地震成像研究的前沿领域。文章针对传统 Q 值估计方法不能较好估计复杂介质中，特别是深度域中非均匀

Q 值场展开，发展了一整套从地震反射成像数据中拾取 Q 值的新流程，同时克服了常规方法拾取 Q 值时所面对的薄层调谐带来的不利影响。该套流程可以与现有的常规数据处理流程很好地相结合，适合在实际应用层面上推广，估计出的 Q 值场不再是简单背景场，而是在深度方向可以连续变化，横向上弱变化的非均匀场。同时文中所述方法是时间域方法的拓展，是一种能够处理复杂构造并能够对地层吸收效应进行补偿的数据处理流程。由于文中应用的方法可以建立深度域非均匀 Q 值场，配合黏弹性叠前深度偏移成像手段进行补偿吸收衰减的叠前深度成像，这样更准确地考虑了地震波在吸收衰减介质中的实际传播路径。它通过对相位和振幅的单独控制来补偿衰减损失，恢复传播过程中被衰减的高频分量，并且能够处理局部剧烈变化的 Q 值场，从而获得更高的成像分辨率。这对于解决勘探开发面临的地震成像问题而言，具有重要意义。下一步工作将开展基于深度学习的 Q 值反演方法研究，以期能更加智能地使用数据驱动的方式解决深度域 Q 值建模的难题。

References

- AKI K, RICHARDS P G, 1980. Quantitative seismology [M]. San Francisco: W. H. Freeman & Co.
- CAO S Y, TAN J, GAO M, et al., 2014. Seismic Q estimation with logarithmic spectrum equation root [J]. Oil Geophysical Prospecting, 49 (1): 161-166. (in Chinese with English abstract)
- CAUSSE E, URSIN B, 2000. Viscoacoustic reverse-time migration [J]. Journal of Seismic Exploration, 9 (2): 165-183.
- DUTTA G, SCHUSTER G T, 2014. Attenuation compensation for least-squares reverse time migration using the viscoacoustic-wave equation [J]. Geophysics, 79 (6): S251-S262.
- FLETCHER R P, NICHOLS D, CAVALCA M, 2012. Wavepath-consistent effective Q estimation for Q -compensated reverse-time migration [C] //74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC 2012. Copenhagen, Denmark: European Association of Geoscientists & Engineers.
- GAO J H, YANG S L, 2007. On the method of quality factors estimation from zero-offset VSP data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 50 (4): 1198-1209. (in Chinese with English abstract)
- HARGREAVES N D, CALVERT A J, 1991. Inverse Q filtering by Fourier transform [J]. Geophysics, 56 (4): 519-527.
- KJARTANSSON E, 1979. Constant Q -wave propagation and attenuation [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 84 (B9):

- 4737-4748.
- LI Z C, GUO Z B, TIAN K, 2014. Least-squares reverse time migration in visco-acoustic medium [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57 (1): 214-228. (in Chinese with English abstract)
- LIU G C, LI C, 2020. Velocity-independent prestack seismic Q estimation based on multi-ray joint inversion [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63 (4): 1569-1584. (in Chinese with English abstract)
- LIU K, ZHAO W J, 2005. Application of seismic phase analysis in the interpretation of deep seismic reflection data [J]. *Journal of Geomechanics*, 11 (2): 129-134. (in Chinese with English abstract)
- MITTET R, SOLLIE R, HOKSTAD K, 1995. Prestack depth migration with compensation for absorption [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 34 (2): 141.
- MITTET R, 2007. A simple design procedure for depth extrapolation operators that compensate for absorption and dispersion [J]. *Geophysics*, 72 (2): S105-S112.
- PANG X Q, LIN H X, ZHENG D Y, et al., 2020. Basic characteristics, dynamic mechanism and development direction of the formation and distribution of deep and ultra-deep carbonate reservoirs in China [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (5): 673-695. (in Chinese with English abstract)
- QUAN Y L, HARRIS J M, 1997. Seismic attenuation tomography using the frequency shift method [J]. *Geophysics*, 62 (3): 895-905.
- SUH S, YOON K, CAI J, et al., 2012. Compensating visco-acoustic effects in anisotropic reverse-time migration [C] //The 2012 SEG Annual Meeting. Las Vegas, Nevada; SEG: 1-5.
- SUN J Z, FOMEL S, ZHU T Y, et al., 2016. Q -compensated least-squares reverse time migration using low-rank one-step wave extrapolation [J]. *Geophysics*, 81 (4): S271-S279.
- TAN Y L, WANG Z X, FENG X Q, et al., 2021. Structural preservation conditions analysis of oil and gas in complex structural area: A case study of structural analysis in the Well Wanjingdi-1, Anhui, China [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (3): 441-452. (in Chinese with English abstract)
- TRAYNIN P, LIU J, REILLY J M, 2008. Amplitude and bandwidth recovery beneath gas zones using Kirchhoff prestack depth Q -migration [C] //The 2008 SEG Annual Meeting. Las Vegas, Nevada; SEG: 2412-2416.
- WANG S D, YANG D F, LI J N, et al., 2015. Q factor estimation based on the method of logarithmic spectral area difference [J]. *Geophysics*, 80 (6): V157-V171.
- WANG X J, YIN X Y, WU G C, 2011. Estimation of stratigraphic quality factors on pre-stack seismic data [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 46 (3): 423-428. (in Chinese with English abstract)
- WANG X J, YAN Z H, LIU X X, et al., 2019. The application of formation Q value compensation method based on wavelet frequency division to the exploration of middle-deep hydrocarbon in the East China Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 39 (6): 200-206. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y H, 2002. A stable and efficient approach of inverse Q filtering [J]. *Geophysics*, 67 (2): 657-663.
- WANG Y H, 2006. Inverse Q -filter for seismic resolution enhancement [J]. *Geophysics*, 71 (3): V51-V60.
- WANG Y H, 2008. Inverse- Q filtered migration [J]. *Geophysics*, 73 (1): S1-S6.
- WU J, CHEN X H, BAI M, et al., 2015. Attenuation compensation in multicomponent Gaussian beam prestack depth migration [J]. *Applied Geophysics*, 12 (2): 157-168. (in Chinese with English abstract)
- WU X D, LIAO J, SUN W Z, et al., 2021. Natural gas distribution and reservoir-forming law of the Yinggehai Basin, China [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (6): 963-974. (in Chinese with English abstract)
- YAN H Y, LIU Y, 2013. Visco-acoustic prestack reverse-time migration based on the time-space domain adaptive high-order finite-difference method [J]. *Geophysical Prospecting*, 61 (5): 941-954.
- YUAN S Y, WANG S X, TIAN N, et al., 2016. Stable inversion-based multitrace deabsorption method for spatial continuity preservation and weak signal compensation [J]. *Geophysics*, 81 (3): V199-V212.
- ZENG X, TIAN J X, ZHANG G Q, et al., 2018. Main Types and hydrocarbon exploration direction of the paleo-uplifts in the Qaidam Basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (3): 381-390. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H, XU J C, LI J B, 2016. Enhanced 3D prestack depth Imaging of broadband data from the South China Sea: A case study [J]. *Exploration Geophysics*, 47 (3): 219-227.
- ZHANG J F, WU J Z, LI X Y, 2013. Compensation for absorption and dispersion in prestack migration: An effective Q approach [J]. *Geophysics*, 78 (1): S1-S14.
- ZHANG L Y, FAN K, HUANG C J, et al., 2011. Potential of the deep oil-gas reservoir-forming and exploitation direction in Jizhong depression [J]. *Journal of Geomechanics*, 17 (2): 144-157. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Q, JI F, 2021. Geophysical characteristics of the Terror Rift, West Antarctica [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (5): 809-820. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO J, GAO J H, WANG D X, et al., 2013. Estimation of quality factor Q from pre-stack CMP records [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56 (7): 2413-2428. (in Chinese with English abstract)
- ZHU T Y, HARRIS J M, BIONDI B, 2014. Q -compensated reverse-time migration [J]. *Geophysics*, 79 (3): S77-S87.

ZOU P, CHENG J B, 2020. Visco-acoustic wave equation reflection inversion for the Q model [J]. Chinese Journal of Geophysics, 63 (1): 287-297. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

曹思远, 谭佳, 高明, 等, 2014. 对数谱根式法 Q 值反演 [J]. 石油地球物理勘探, 49 (1): 161-166.

高静怀, 杨森林, 2007. 利用零偏移 VSP 资料估计介质品质因子方法研究 [J]. 地球物理学报, 50 (4): 1198-1209.

李振春, 郭振波, 田坤, 2014. 黏声介质最小平方逆时偏移 [J]. 地球物理学报, 57 (1): 214-228.

刘国昌, 李超, 2020. 基于多射线联合反演的速度无关叠前地震数据 Q 值估计 [J]. 地球物理学报, 63 (4): 1569-1584.

刘葵, 赵文津, 2005. 地震相分析在深反射地震勘探资料解释中的应用 [J]. 地质力学学报, 11 (2): 129-134.

庞雄奇, 林会喜, 郑定业, 等, 2020. 中国深层和超深层碳酸盐岩油气藏形成分布的基本特征与动力机制及发展方向 [J]. 地质力学学报, 26 (5): 673-695.

谭元隆, 王宗秀, 冯兴强, 等, 2021. 复杂构造区油气构造保存条件分析: 来自皖泾地 1 井的构造解析 [J]. 地质力学学报, 27 (3): 441-452.

王小杰, 印兴耀, 吴国忱, 2011. 基于叠前地震数据的地层 Q 值估计 [J]. 石油地球物理勘探, 46 (3): 423-428.

王小杰, 颜中辉, 刘欣欣, 等, 2019. 基于小波分频的 Q 值补偿技术在东海中深层油气勘探中的应用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 39 (6): 200-206.

吴娟, 陈小宏, 白敏, 等, 2015. 基于吸收衰减补偿的多分量高斯束叠前深度偏移 (英文) [J]. 应用地球物理, 12 (2): 157-168.

吴迅达, 廖晋, 孙文钊, 等, 2021. 莺歌海盆地天然气运聚成藏条件与分布富集规律 [J]. 地质力学学报, 27 (6): 963-974.

曾旭, 田继先, 张国卿, 等, 2018. 柴达木盆地古隆起主要类型及油气勘探方向 [J]. 地质力学学报, 24 (3): 381-390.

张林炎, 范昆, 黄臣军, 等, 2011. 冀中坳陷深层油气成藏潜力与勘探方向 [J]. 地质力学学报, 17 (2): 144-157.

张峤, 纪飞, 2021. 西南极特拉裂谷综合地球物理特征分析 [J]. 地质力学学报, 27 (5): 809-820.

赵静, 高静怀, 王大兴, 等, 2013. 利用叠前 CMP 资料估计介质品质因子 [J]. 地球物理学报, 56 (7): 2413-2428.

邹鹏, 程玖兵, 2020. 黏声方程 Q 值反射波反演 [J]. 地球物理学报, 63 (1): 287-29.