

doi: 10.12029/gc20190514

国瑞,侯贺晟,符伟,杨璠,冯暄,卢占武,周怀来. 2019. 松科二井深地震反射数据 Q 值分析及其对含气层位的确定[J]. 中国地质, 46(5): 1137-1145.

Guo Rui, Hou Hesheng, Fu Wei, Yang Jin, Feng Xuan, Lu Zhanwu, Zhou Huailai. 2019. Q value analysis of deep seismic reflection data of Well SK-2 and its determination of gas-bearing stratum[J]. Geology in China, 46(5): 1137-1145(in Chinese with English abstract).

松科二井深地震反射数据 Q 值分析 及其对含气层位的确定

国瑞¹,侯贺晟^{1,2},符伟¹,杨璠¹,冯暄³,卢占武²,周怀来^{4,5}

- (1. 中国地质科学院,北京 100037;2. 自然资源部深地动力学重点实验室,中国地质科学院地质研究所,北京 100037;
3. 吉林大学地球探测科学与技术学院,吉林 长春 130026;4. 成都理工大学地球物理学院,四川 成都 610059;
5. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610059)

摘要:地震波在地下介质中传播时,地震波能量会出现一定程度的衰减,品质因子 Q 作为衡量地下岩石吸收衰减属性的重要参数,对描述岩性特征以及预测油气分布具有重要意义。本文针对深地震反射数据,利用基于 S 变换谱比法的 Q 值分析技术,获得了更加准确的 Q 值。以松辽盆地沙河子组为主要目标层,对穿过松科二井的叠后深地震反射剖面进行 Q 值计算,生成 Q 值剖面,总结出沙河子组 Q 值分布特征,同时结合松科二井测井、分层和气测异常资料进行分析,推断沙河子组为含气储层,为下一步深部储层预测提供思路,为东北地区深地勘查工程提供服务。

关键词:松科二井;品质因子 Q ;谱比法 S 变换;深地震反射剖面;含气储层;深地勘查工程

中图分类号:P631.4⁴;P618.13 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2019)05-1137-09

Q value analysis of deep seismic reflection data of Well SK-2 and its determination of gas-bearing stratum

GUO Rui¹, HOU Hesheng^{1,2}, FU Wei¹, YANG Jin¹, FENG Xuan³, LU Zhanwu², ZHOU Huailai^{4,5}

- (1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. College of Geoprospection Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China; 4. College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 5. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: When the seismic wave propagates in the underground media, the seismic wave energy will show a certain degree of attenuation. The quality factor Q is an important parameter for measuring the absorption and attenuation properties of the

收稿日期:2019-03-15;改回日期:2019-06-08

基金项目:中国地质调查局项目(DD20160207, DD20190010)、国家自然科学基金项目(41474081, 41430213, 41590863)及自然资源部深地动力学重点实验室自主研究课题(J1901-3)联合资助。

作者简介:国瑞,男,1996年生,硕士,主要从事深地震反射数据处理与解释研究;E-mail:guoruicdudt@163.com。

通讯作者:侯贺晟,男,1980年生,副研究员,主要从事深部探测与深部能源远景分析研究;E-mail:hesheng.hou@126.com。

underground rock, and is of great significance for describing the lithological characteristics and predicting the oil and gas distribution. In this paper, the Q value analysis technique based on S transformation ratio method for deep seismic reflection data was developed, and the more accurate Q value was obtained. Taking the Shahezi Formation in the Songliao Basin as the main target layer, the authors calculated the Q value of the post-stack deep seismic reflection profile across Well SK-2, and then generated the Q value profile to summarize Q value distribution characteristics of the Shahezi Formation. The Q value distribution characteristics, combined with the logging, stratification and gas anomaly data of Well SK-2, suggest that the Shahezi Formation is a gas reservoir, and this discovery provides a way for the next deep reservoir prediction. This conclusion provides an idea for the further deep reservoir prediction and can serve the deep geological survey project in Northeast China.

Keywords: Well SK-2; quality factor Q ; S transform spectral ratio method; deep seismic reflection profiles; gas reservoir; deep exploration engineering

About the first author: GUO Rui, male, born in 1996, master, mainly engages in deep seismic reflection data processing and interpretation research; E-mail: guoruicdut@163.com.

About the corresponding author: HOU Hesheng, male, born in 1980, associate researcher, mainly engages in the study of deep exploration and deep energy perspective analysis; E-mail: hesheng.hou@126.com.

1 引 言

国内油气勘探难度越来越大,高精度勘探方法和技术是急需解决的问题,浅层油气资源大部分已被开采,油气勘探向深层进军势在必行。非弹性介质对地震波的吸收,导致深层地震反射资料的分辨率非常低,难以达到目前勘探精度的需求,所以研究地震波的吸收衰减对于提高深地震资料品质、储层反演和预测等有着重要意义。

自1962年 Futterman 第一次对地震波吸收衰减进行研究以来,地震波衰减研究逐渐成为热门研究领域(巫南克,2016)。地震波的吸收衰减可以分为两类:一类是运动学类衰减,主要是球面扩散,以及地层间的反射、透射和折射;一类是地下介质本身属性引起的衰减,这种介质本身的衰减特性,用品质因子 Q 来表示。一般定义为,在一个周期内总能量 E 与损失能量 ΔE 比值的 2π 倍,即 $Q=2\pi \frac{E}{\Delta E}$ 。 Q 是一个无量纲的量,介质 Q 值越大,能量损耗越小(李录明和李正文,2007)。介质 Q 值与其压力、温度、结构构造以及孔渗饱等参数紧密相关(马昭军和刘洋,2005)。

Q 值的估计方法一般来说可以分为直接估计法和反演类法,但是这些方法适用的地震数据类型不同(戴建芳,2014)。 Q 值直接估计法,分为三大类,一类是在时间域,主要有上升时间法、解析信号法、匹配法、子波模拟法、振幅衰减法等;另一类是

在频率域,主要方法有频谱模拟法、谱比法、 Q 值扫描补偿法、质心频率偏移法、峰值频率法等;还有一类是基于时频分析理论的时频域方法。李庆忠(1994)归纳品质因子 Q 随纵波速度 V_p 的变化趋势,推得经验公式。Tonn(1989)对计算 Q 值的7种计算方法进行了比较,认为没有哪一种方法适用于任何情况,实际效果依旧依赖于地震记录的质量。经过长期的研究,许多新的方法涌现出来,Sun(2000)利用地震的全波形广义线性反演方法反演品质因子 Q 值。于倩倩等(2017)对传统谱比法进行改进,结合走时层析方法反演 Q 值,提高了精度和效率。杨学亭(2015)基于 Gabor 反褶积理论,提出一种基于 Gabor 反褶积的 Q 值计算方法。叠前地震资料包含了更加丰富的地震波信息,利用叠前资料估算地层 Q 值成为新的突破口(赵宪生和黄德济,1994; Dasgupta and Clark, 1998; 王小杰等,2011; 姜洪涛,2011; 毕丽飞,2014)。

目前,谱比法是最常用的 Q 值计算方法,首先要用一个时间窗截取地层顶底界面地震记录,然后计算截取地震记录的频谱,再拟合频谱比斜率值求出品质因子 Q 值(付勋勋等,2013)。拟合时窗类型、长度及拟合频带范围,都要根据实际地层厚度和实际数据来具体选择,如果选择参数不准确将影响品质因子估计精度,而且薄层具有调谐作用,传统谱比法只适用于一定厚度的地层。因此,各种时频分析技术被引入到 Q 值估计中,用来提取反射地震记录的振幅谱(郝亚炬等,2017)。

松辽盆地断陷深部洼槽带油气调查程度较低,制约了资源调查战略导向,松辽盆地深层油气调查能够加强盆地油气资源开发,对于拓展我国能源勘查开发的空間具有重要意义。深地震反射剖面能够对地壳、上地幔深层精细结构进行地震波成像,是深部探测的最有力武器,故对深地震反射剖面计算 Q 值可知深层地震波衰减特征。本文利用S变换时频谱具有较高时频分辨率的特征,对松辽盆地叠后深地震反射资料进行处理,获得每个地震道的时频谱,再拟合频谱比斜率值,进而求得 Q 值形成 Q 值剖面,提高了 Q 值计算精度。通过对实际资料的计算分析,证明此方法可以用于叠后深地震反射资料,有效地预测松科二井领域的深部储层。

2 基本理论

2.1 通过谱比法求取品质因子 Q

当地震波在地下介质中传播时,能量和振幅都随着时间而衰减。采用谱比法计算地层介质的品质因子,必须在目的层的上、下层位分别选取两个标准的反射地震子波记录段,进行频谱分析和品质因子计算(巫南克和周怀来,2016)。假如存在两个时间点 t_1 和 t_2 , t_2 是后时刻,地震波在两点的振幅可以表示为 $B_1(f,t_1)$ 和 $B_2(f,t_2)$,其中 f 为频率,两点振幅相除后取对数得:

$$\ln \left(\frac{B_2(f,t_2)}{B_1(f,t_1)} \right) = C - \frac{\pi f (t_2 - t_1)}{Q} \quad (1)$$

可以把 C 作为与 t 相关的常数,那么

$$\ln \left(\frac{B_2(f,t_2)}{B_1(f,t_1)} \right) \text{和} f \text{存在上述的线性关系,把(1)式}$$

看成一次函数,那么 $-\frac{\pi (t_2 - t_1)}{Q}$ 作为 f 的系数就成了斜率,利用线性回归得到一个斜率 k ,从而得到 $t_2 - t_1$ 对应地层的品质因子 Q 值。求取品质因子 Q 的公式:

$$Q = - \frac{\pi (t_2 - t_1)}{k} \quad (2)$$

2.2 通过S变换求地震波时频谱

在谱比法求取 Q 值过程中,利用S变换优秀的时频分析特性,来求取 t 时刻的振幅谱 $B(f,t)$,可以克服传统谱比法分辨率低的问题。S变换是Stockwell et al.(1996)提出的一种无损可逆的时频

分析工具,是短时傅里叶变换与小波变换混合的产物。S变换一般可以用两种方式推导得到,一种方式是从短时窗Fourier变换得到,另一种方式是从连续小波变换推导得到(邹文,2005)。

信号 $h(t)$ 的一维连续S正变换的有如下定义:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2} \right] \exp(-i2\pi ft) dt \quad (3)$$

式中 t 为时间, f 为频率, τ 为时窗函数的中心点,它控制高斯窗函数在时间轴上的位置。实际地震信号为采样所得的离散信号,故S变换采用离散数值方法实现。姬战怀和严胜刚(2015)对离散S变换进行了研究,设信号时域长度为 t ,采样间隔为 T ,则总采样点数 $N=t/T$ 。令 $f \rightarrow n/(NT)$, $\tau \rightarrow kT$,则可以得到离散S变换公式:

$$S(kT, \frac{n}{NT}) = \sum_{m=0}^{N-1} H \left(\frac{m+n}{NT} \right) \exp \left(-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2} \right) \exp \left(\frac{j2\pi mk}{N} \right) \quad (4)$$

$$k, m = 0, 1, 2, \dots, N-1; n = 1, 2, \dots, N-1$$

2.3 不同时频变换谱比法 Q 值估算效果对比分析

S变换能够同时利用时间和频率描述地震信号,具有良好的时频分辨率。相对于小波变换、傅里叶变换,S变换具有独特的优点,如信号S变换的时频谱分辨率与频率相关,不但有多尺度聚焦性,还与其傅里叶谱直接相联系,保持频率的绝对相位,其基本小波不用满足容许性条件(付勋勋等,2013)。不同时频变换方法计算 Q 值的精度,是谱比法研究的关键问题。赵秋芳等(2018)针对短时傅里叶变换、小波变换和S变换三种方法,基于三层水平层状介质模型(目的层 $Q=50$),对比分析了三种时频变换谱比法品质因子 Q 估算效果,认为基于S变换的谱比法 Q 估算精度最高。

计算三种时频变换谱比对数值随频率变化以及拟合曲线(图1),得到 Q 值。S变换的谱比对数值随频率变化整体比较稳定,拟合效果好。小波变换的谱比对数值随频率变化在45 Hz突变,仅在中低频段拟合效果好。短时傅里叶变换较前两种变换相比,谱比对数局部波动大,拟合效果不理想。从最后的 Q 值计算结果也可以看出,基于S变换的谱

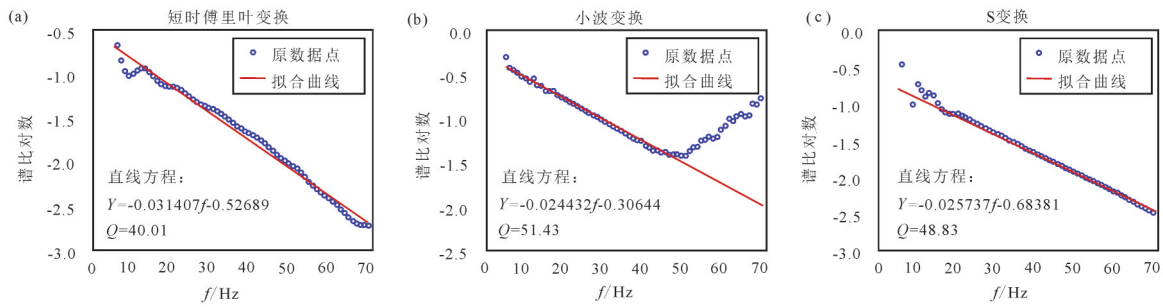


图1 三种时频变换谱比数值随频率变化及拟合效果对比(据赵秋芳等,2018)

Fig.1 Comparison of fitting effects of spectral ratio logarithm and frequency for three time frequency transform(after Zhao et al., 2018)

比法计算精度最高。

3 模型试算

设计一个2D六层水平层状介质模型,其初始速度和 Q 值如图2,密度均为1。第二层中段相对两侧为低速段,根据速度越大 Q 值越大的关系,第二层中段相对两侧为低 Q 值。利用褶积算法进行正演模拟,获得合成地震记录(图3)。地震模拟使用主频60 Hz的雷克子波。由于地震波传播中的衰减,合成地震记录中除了浅部两反射层同相轴能量较强外,其他层同相轴能量都比较弱。

本文针对此合成地震记录,开展了基于S变换谱比法 Q 值计算,对于每一个地震道,利用S变换做时频谱分析,线性回归得到频谱比数值与频率的关系,计算得到 Q 值(图4)。由于第一层和第六层无法计算,令其反演出的值为初值,反演结果与初始 Q 值模型只有微小的偏差(表1),验证了方法的合理性。

4 实际地震资料分析

为验证本文所用基于S变换的谱比法在实际资料处理中的可行性,对松辽盆地某过松科二井深地震反射剖面进行 Q 值估计。本文所研究的主要地层为沙河子组(K_2sh),为中生界白垩系下统,主要岩性为砂岩和泥岩,在松科二井上显示其深度范围为3337~5680 m,由井震标定地震剖面知其时间范围为2100~3200 ms。松辽盆地是中国东部大型的中新生代含油气沉积盆地之一(章凤奇等,2008),构造呈现“上拗下断”的格局,断陷深部洼槽带富含有机质的地层累计厚度大,有机质丰度高,处于高成熟—过成熟的热演化阶段(侯贺晨等,2018)。断陷层沉积了巨厚的沙河子组地层,岩性以泥岩为主,富含有机质,为深部油气藏的形成提供了很好的物源。同时断陷层地层较少发育断裂,为形成有效圈闭提供了有利条件,营城组、沙河子组和火石岭组

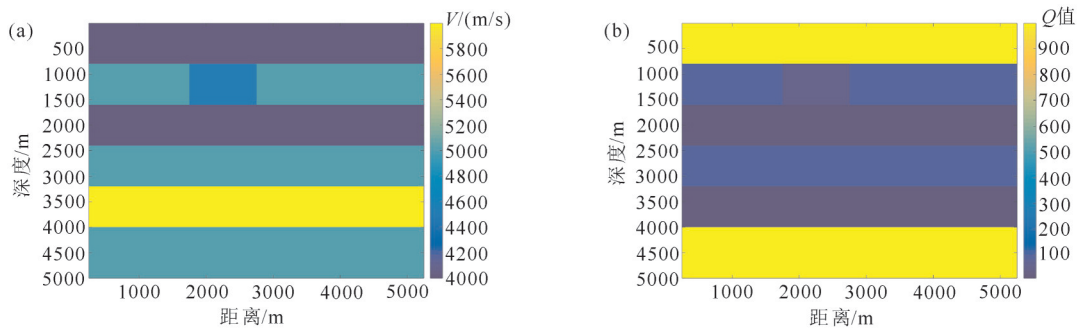


图2 正演地质模型

a—正演初始速度模型;b—正演初始 Q 值模型

Fig.2 Forward geological modeling

a—Forward modeling of initial velocity;b—Forward modeling of initial Q values

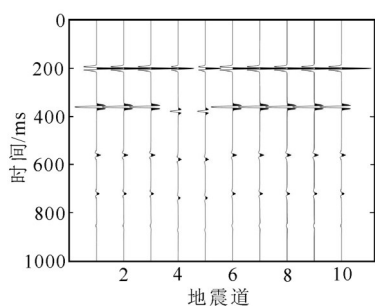


图3 合成地震记录
Fig.3 Synthetic seismogram

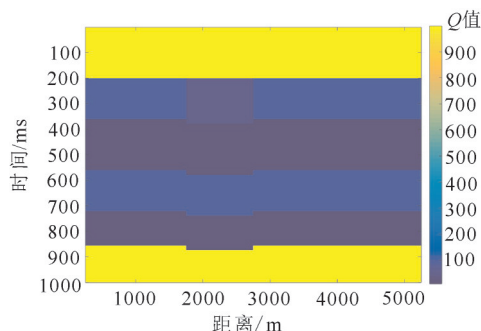


图4 反演 Q 值分布
Fig.4 Inversion of the Q value distribution

共同组成了断陷期自生自储型成藏组合(张君峰等,2018)。

过松科二井的叠后深地震反射剖面(图5)显示,橙线和绿线之间为沙河子组地层,图5纵坐标是双程旅行时横坐标是CDP(Common Depth Point,共深度点)点号。基于本文方法对图5剖面计算,得到 Q 值剖面(图6),松科二井测井曲线、分层数据及气测异常显示如图7。从图6可以看出,松辽盆地地下岩层的 Q 值随深度的增加而增大,与陈树民等

(2001)的研究结果一致。地层含流体后对地震波吸收衰减增强,其响应特征为 Q 值低异常,因此可以通过地震波衰减特征即 Q 值来进行流体预测(郝亚炬等,2017)。地层含流体性质不同,对地震波衰减程度不同,含气地层吸收地震波能量较其他含流体地层强(Ebrom, 2004),高频分量衰减迅速,而低频分量衰减相对比较少。松科二井邻域沙河子组(图6黑线圈住区域)地层 Q 值明显偏低,并且井旁地震道时频谱(图8)显示,沙河子组主频降低的速

表1 Q 值计算结果统计

Table 1 Statistical table of Q value calculation results

项目	第1层	第2层	第2层中段	第3层	第4层	第5层	第6层
原始 Q 值	1000	100	50	20	100	10	1000
反演 Q 值	1000	99.92	50.25	20.13	99.52	10.07	1000
Q 值误差/%	0	0.08	0.5	0.65	0.48	0.7	0

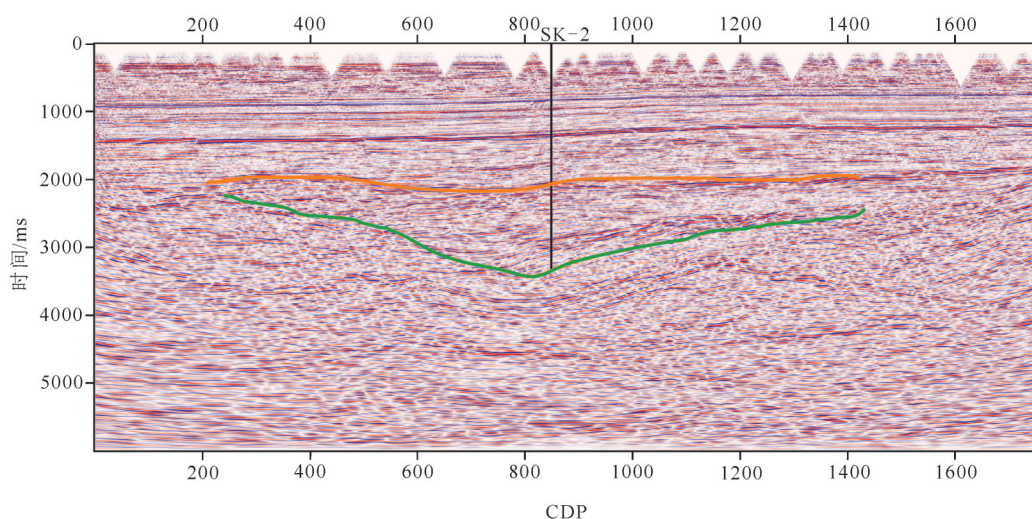


图5 过松科二井的叠后深地震反射剖面
Fig.5 The post-stack deep seismic reflection profile across Well SK-2

度明显较快,所以推测沙河子组为含气地层。结合图7中的气测异常资料,证实沙河子组地层存在大量气藏,验证了含气储层吸收衰减能力强的特点。因此,本文利用基于S变换的谱比法估算出的结果,与实际气测异常资料相吻合,证明此方法可以用来有效地预测深部储层。

利用S变换对井旁地震道(CDP点号855)求取时频谱(图8),随着深度增加,主频逐渐减小,频带

逐渐变窄,其高频成分衰减很快,能量在逐步向低频的方向移动。2100~3000 ms(沙河子组为2100~3200 ms)主频降低的速度明显较快,这与沙河子组的气测异常相吻合。利用本文方法对井旁地震道(CDP点号855)进行Q值计算(图8)。在1000 ms附近出现一个相对低值,结合地质资料分析,为嫩江组地层,是大庆一个重要的产油层。当地震波在含油气储层中传播时,能量会发生明显的衰减,Q值

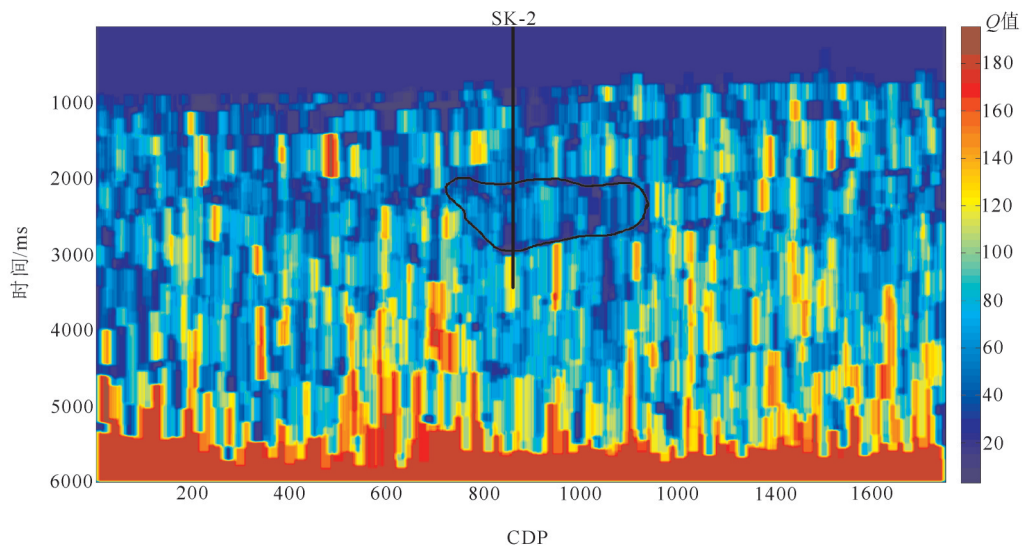


图6 基于S变换的谱比法计算的Q值剖面

Fig.6 Q-value profile calculated by spectral ratio method based on S-transform

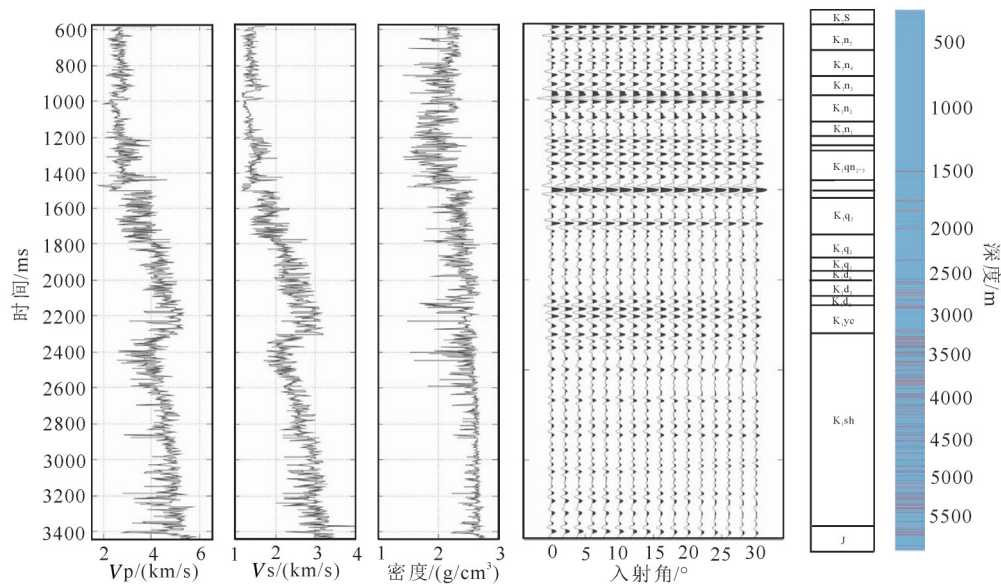


图7 松科二井测井曲线、分层数据及气测异常图

Fig.7 Logging curve, stratified data and gas measurement anomaly in Well SK-2

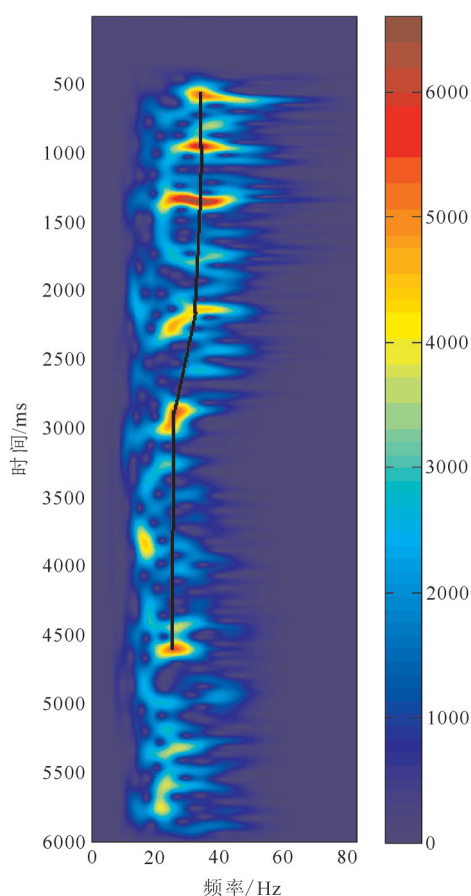


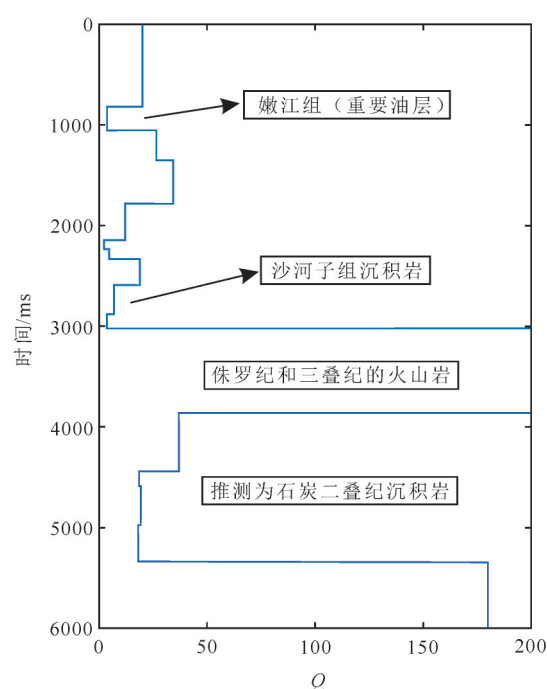
图8 井旁地震道时频谱

Fig.8 Seismic trace time spectrum near the well

较低。在2100~3000 ms, Q 值相对小,具有一定的油气潜力。在3000~4000 ms Q 值整体较大,认为存在侏罗纪和三叠纪的火山岩(Yin et al., 2019)。4000~5400 ms之间推测为石炭二叠纪的沉积岩, Q 值相对上覆火山岩小得多,这些推断为下一步的地层验证提供了思路。需要指出的是,松科二井处沙河子组地层底界在地震剖面对应到3200 ms左右,但由图6、图8知,3000 ms处计算得到的 Q 值突变,分析其原因,可能是在弱振幅的地方调谐干涉效应改变了其频谱,本文方法在弱反射振幅的地方计算 Q 值不够精确,沙河子底部的强反射只到3000 ms,因此3000 ms处计算得到的 Q 值突变,此方法还需进一步改进。

5 结论

(1)本文在讨论谱比法和S变换基本原理的基础上,进行了模型试算,验证了方法的合理性。基

图9 对井旁地震道 Q 值计算及解释Fig.9 Calculation and interpretation of seismic trace Q value near the well

于叠后深地震反射资料,利用S变换计算时频谱并结合谱比法求取品质因子 Q 值,发展了针对深地震反射数据基于S变换谱比法的 Q 值分析技术。

(2)通过对松科二井深地震反射剖面数据 Q 值计算,发现随着深度增加,主频逐渐减小,频带变窄,能量在逐步向低频的方向移动,松辽盆地地下岩层的 Q 值逐渐增大,其中沙河子组主频降低的速度明显较快。利用本文方法计算的沙河子组地层 Q 值明显偏低,与气测异常资料吻合,印证沙河子组为含气储层,显示了含气储层吸收衰减能力强的特点,表明这套方法可以用来有效地预测深部储层,为松辽盆地深层油气资源开发提供了依据。

致谢:本文在写作过程中得到了张交东研究员、张奎博士及朱海华高工的建议,在此表示衷心的感谢!

References

- Bi Lifei. 2014. Q value extraction technique for prestack formation based on time-frequency analysis[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 36(12): 70-73, 6 (in Chinese with English abstract).
Chen Shumin, Song Yongzhong, Niu Yanliang. 2001. A study on the

- absorption characteristics of rocks and the rule of wave attenuation in Songliao Basin[J]. *Progress in Geophysics*, 16(4): 43–52 (in Chinese with English abstract).
- Dai Jianfang. 2014. High Accuracy Prestack Q -Determination Based on Raypath Theory[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Dasgupta R, Clark R A. 1998. Estimation of Q from surface seismic reflection data[J]. *Geophysics*, 63(6): 2120–2128.
- Ebrom D. 2004. The low-frequency gas shadow on seismic sections[J]. *The Leading Edge*, 23(8):772.
- Fu Xunxun, Zhang Junxue, Chen Zhen, Xū Feng, Zhuo Xinxv, Nan Nana, Zheng Bowen. 2013. The estimation of Q quality factor based on S-transform[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 37(1): 113–116 (in Chinese with English abstract).
- Hao Yajv, Huang Handong, Wen Xiaotao, Zhu Baoheng, Li Huijie, Zhang Lihua. 2017. Q estimation in the generalized S domain and its application in the hydrocarbon detection[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 52(5): 1059–1066,882–883 (in Chinese with English abstract).
- Hou Hesheng, Wang Chengshan, Zhang Jiaodong, Ma Feng, Fu Wei, Wang Pujun, Huang Yongjian, Zou Changchun, Gao Youfeng, Gao Yuan, Zhang Laiming, Yang Jin, Guo Rui. 2018. Deep continental scientific drilling engineering in Songliao Basin: Progress in earth science research[J]. *Geology in China*, 45(4): 641–657 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Hongtao. 2011. The Forward and Inverse of Q Value Using Prestack CMP Gather Data[D]. Xi'an: Chang'an University (in Chinese with English abstract).
- Ji Zhanhuai, Yan Shenggang. 2015. Comparison of performance between discrete S transform frequency-domain algorithm and time-domain[J]. *Computer Engineering and Applications*, 51(20): 16–21 (in Chinese with English abstract).
- Li Luming, Li Zhenwen. 2007. Principle, Method and Interpretation of Seismic Exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 27–29 (in Chinese).
- Li Qingzhong. 1994. The Way to Obtain a Better Resolution in Seismic Prospecting: A Systematical Analysis of High Resolution Seismic Exploration[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 38–39 (in Chinese).
- Ma Zhaojun, Liu Yang. 2005. A summary of research on seismic attenuation[J]. *Progress in Geophysics*, 20(4): 1074–1082 (in Chinese with English abstract).
- Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. 1996. Localization of the complex spectrum: The S transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 44(4): 998–1001.
- Sun S. 2000. Determination of Seismic Attenuation from Surface and Downhole Measurements[D]. Oklahoma: The University of Oklahoma.
- Tonn R. 1989. Comparison of seven methods for the computation of Q [J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 55(3/4): 0–268.
- Wang Xiaojie, Yin Xingyao, Wu Guochen. 2011. Estimation of stratigraphic quality factors on prestack seismic data[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 46(3): 423–428,500,327 (in Chinese with English abstract).
- Wu Nanke. 2016. Study on the Calculation and Stability of Quality Factor Q [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Wu Nanke, Zhou Huailai. 2016. The influence factors of the spectral ratio method and its application effect analysis[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 38(2): 225–231 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xueting. 2015. The Study on the Seismic Wave Energy Compensation Methods Based on the Time-Frequency Analysis [D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Yin Yongkang, Gao Youfeng, Wang Pujun, Qu Xuejiao, Liu Haibo. 2019. Discovery of Triassic volcanic-sedimentary strata in the basement of Songliao Basin[J]. *Science Bulletin*, 64(10): 644–646.
- Yu Qianqian, Li Zhenchun, Zhang Min, Zhang Kai, Yu Zhennan, Zhang Xin, Pan Dong. 2017. The study of seismic attenuation tomography inversion based on spectrum ratio method[J]. *CT Theory and Applications*, 26(5): 533–541 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Fengqi, Chen Hanlin, Dong Chuanwan, Yu Xing, Xiao Jun, Pang Yanming, Cao Ruicheng, Zhu Defeng. 2008. Deep continental scientific drilling engineering in Songliao Basin: Progress in Earth science research[J]. *Geology in China*, 35(3): 421–428(in Chinese with English abstract).
- Zhang Junfeng, Xu Hao, Zhao Junlong, Ren Pengfei. 2018. Geological characteristics and exploration potential of oil and gas in the northeast area of China[J]. *Geology in China*, 45(2): 260–273 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Qiufang, Dang Pengfei, Yun Meihou, Li Weina. 2018. Comparative analysis of quality factor Q estimated by spectral ratio method based on different time frequency transform[J]. *Progress in Geophysics*, 33(5): 2097–2101 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xiansheng, Huang Deji. 1994. Forward modeling and inverse filtering for Q of seismograms[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 33(2):42–48 (in Chinese with English abstract).
- Zou Wen. 2005. S-transform Time-frequency Analysis Technology and its Application Research in Seismic Prospecting[D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).

附中中文参考文献

- 毕丽飞. 2014. 基于时频分析叠前地层 Q 值提取方法研究[J]. *石油天然气学报*, 36(12): 70–73,6.
- 陈树民, 宋永忠, 牛彦良. 2001. 松辽盆地地层吸收特性和地震波衰

- 减规律研究[J]. 地球物理学进展, 16(4): 43-52.
- 戴建芳. 2014. 基于射线路径的叠前高精度 Q 值提取方法研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 付勋勋, 张君学, 陈阵, 徐峰, 卓新叙, 南娜娜, 郑博文. 2013. 基于 S 变换求取地层的品质因子 Q 值[J]. 物探与化探, 37(1): 113-116.
- 郝亚炬, 黄捍东, 文晓涛, 朱宝衡, 李惠杰, 张丽华. 2017. 广义 S 域 Q 值估计方法及其在油气检测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 52(5): 1059-1066, 882-883.
- 侯贺晟, 王成善, 张交东, 马峰, 符伟, 王璞琚, 黄永建, 邹长春, 高有峰, 高远, 张来明, 杨璠, 国瑞. 2018. 松辽盆地大陆深部科学钻探地球科学研究进展[J]. 中国地质, 45(4): 641-657.
- 姜洪涛. 2011. 叠前CMP道集衰减特性 Q 值正反演研究[D]. 西安: 长安大学.
- 姬战怀, 严胜刚. 2015. 离散 S 变换的频域算法和时域算法比较[J]. 计算机工程与应用, 51(20): 16-21.
- 李录明, 李正文. 2007. 地震勘探原理、方法和解释[M]. 北京: 地质出版社, 27-29.
- 李庆忠. 1994. 走向精确勘探的道路: 高分辨率地震勘探系统工程剖析[M]. 北京: 石油工业出版社, 38-39.
- 马昭军, 刘洋. 2005. 地震波衰减反演研究综述[J]. 地球物理学进展, 20(4): 1074-1082.
- 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, 500, 327.
- 巫南克. 2016. 品质因子 Q 的提取及稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 巫南克, 周怀来. 2016. 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, 38(2): 225-231.
- 杨学亭. 2015. 基于时频分析的地震波能量衰减补偿方法研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 于倩倩, 李振春, 张敏, 张凯, 于振南, 张欣, 潘东. 2017. 谱比法地震衰减层析反演方法研究[J]. CT理论与应用研究, 26(5): 533-541.
- 章凤奇, 陈汉林, 董传万, 余星, 肖骏, 庞彦明, 曹瑞成, 朱德丰. 2008. 松辽盆地北部存在前寒武纪基底的证据[J]. 中国地质, 35(3): 421-428.
- 张君峰, 许浩, 赵俊龙, 任鹏飞. 2018. 中国东北地区油气地质特征与勘探潜力展望[J]. 中国地质, 45(2): 260-273.
- 赵秋芳, 党鹏飞, 云美厚, 李伟娜. 2018. 不同时频变换谱比法品质因子 Q 估算效果对比分析[J]. 地球物理学进展, 33(5): 2097-2101.
- 赵宪生, 黄德济. 1994. 地震记录的 Q 值正演模拟与反滤波[J]. 石油物探, 33(2): 42-48.
- 邹文. 2005. S -变换时频分析技术及其在地震勘探中的应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学.