

分频技术在塔中地区地震储层边界刻画中的应用

林年添^{1,2}, 孙 剑^{1,2}, 汤健健³, 王晓东^{1,2}, 李桂花^{1,2}

(1. 山东科技大学 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 地质科学与工程学院 山东 青岛 266590;

3. 浙江省第九地质大队, 浙江 湖州 313000)

摘 要:为了减少甚至排除时间域内不同频率成份的相互干扰,将基于短时窗离散傅氏变换或基于 Z 变换的最大熵谱方法的分频技术应用用于塔中某区地震属性分析中,以获取高于传统频谱分析分辨率的解释结果,提高地震储层边界的刻画精度。实测数据分析表明,由分频算法所得到的目的层时-频切片相比于传统的地震属性,其频带界限(对应于能量体的分布或调谐厚度的变化)更清晰,更有利于地震储层的边界刻画及分布预测。

关键词:地震属性;分频技术;提高分辨率;地震储层;预测

中图分类号:P631.4

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)04-0018-08

Spectral Decomposition Technology and Its Application to Improving Resolution of Frequency Spectrum

LIN Niantian¹, SUN Jian¹, TANG Jianjian², WANG Xiaodong¹, LI Guihua¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. College of Geological Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

3. Ninth Geological Team of Zhejiang Province, Huzhou, Zhejiang 313000, China)

Abstract: In order to reduce or even eliminate the mutual interference of different frequency in the time domain, the spectral decomposition technology based on windowed shorted-time Fourier transform or maximum entropy method of Z-transform can be applied to the seismic attribute analysis in the research area. By using this technique, the higher resolution than the result from the tradition spectral analysis is obtained and the seismic reservoir prediction effect is improved. The time-frequency slice of the target area acquired by the time-frequency algorithm shows more details, and it is easier to distinguish the boundary of the frequency band corresponding to the energy map or turning thickness, therefore, it is more beneficial to predict the reservoir and outline its distribution, compared to conventional seismic attributes.

Key words: seismic attribute; spectral decomposition; improving resolution; seismic reservoir; prediction

自复地震道技术问世以来^[1],相关地震属性分析技术应运而生,其应用愈加广泛。其中,频谱分析技术不仅被应用于检测油气藏^[2],而且还被应用于预测目的层厚度^[3]等。地震振幅、频率等作为地震储层预测的主要参数,由于受到常规地震主频及分辨率的限制,获取的地质信息并不能够满足精细勘探与解释的要求^[4]。

基于短时窗离散傅里叶变换或最大熵方法的分频解释技术^[4-5],实现了在频率域内通过调谐振幅的对应

收稿日期:2011-05-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41174098,40904009);国家高技术发展计划(“863”计划)项目(2012AA061202)

作者简介:林年添(1962—),男,福建宁德人,教授,博士,主要从事地震信号处理、成像方法及地质与地球物理综合研究。

E-mail:linnt@sina.com

关系来研究储层横向变化规律,有效地避免了常规属性分析的调谐陷阱,使地震资料解释可得到高于常规地震主频率对应 1/4 波长的时间分辨率^[5-6],从而提高对薄储层的识别能力。由于该技术可提取地震资料有效带宽范围内所有离散频率对应的调谐振幅,实现以交互、动态方式研究薄层在纵横向上的连续变化^[7],使得地震资料解释人员能够在频率域内开展储层研究工作^[8],能更客观地反映地质体外形,刻画薄储层分布,寻找岩性油气藏边界^[9],已成为现阶段地球物理勘探的一项重要技术^[7]。

针对研究区主要目的层为奥陶系碳酸盐岩储层,具有非均质性强,横向变化快,而地震资料主频和信噪比都较低等特点^[9],通过对目标层段进行分频处理,获取常规地震主频不能达到的分辨率,更好地刻画地震储层边界,为储层分布预测提供可靠的依据。

1 分频技术基本原理

分频解释技术是利用短时窗离散傅氏变换(short-time window discrete Fourier transform, short-time window DFT)将地震数据变换到频率域^[5],在频率域内通过调谐振幅的对应关系来研究储层横向变化规律,可得到高于常规地震主频率对应的分辨率结果^[10]。

对于地震数据的分析过程,时窗的长短对振幅谱的频率响应非常重要^[5-6],传统频谱分析方法与分频解释技术的主要差别之一是数据分析时窗的长短。长、短时窗产生的振幅谱频率响应的差别较大^[6]。在长时窗中,反射系数和噪声的谱都可视为是白噪,两者都为常数,即地震反射波与噪声的频谱形态一致,频谱的形态则由子波的形态决定。根据褶积模型,其地震记录信号的谱就是地震子波的谱^[5]。这是因为地震子波一般都跨越多个层位而不是一个简单的薄层,从而产生复杂的调谐反射,故而,长时窗频谱分解无法得到薄层的反射信息^[6];而在短时窗内,反射系数不再是随机序列,而是离散的几个数值,相对应的谱是一个事先可以预测,具有周期性的陷频序列(图 1),那么由短时窗估算的地震记录信号的频谱就是地震子波的谱与上述周期性陷频序列谱的乘积^[11]。因此,在频率域消除地震子波影响之后,相邻两个频陷间距恰对应于该薄层的时间厚度^[4],这是分频解释技术思想的核心。

将分频技术引入到对三维地震资料的时间厚度以及地质不连续性体解释中,就是要在频率域内对每一个频率所对应的振幅进行分析,以排除时间域内不同频率成份的相互干扰,从而获得高于传统分辨率的解释结果^[12]。

分频解释技术主要生成两种类型的数据体:调谐体和离散频率能量体。本文主要讨论离散频率能量体在刻画储层边界中的作用。离散频率能量体是对输入的单个数据体沿短滑动时窗计算生成一系列离散频率振幅和相位体。与调谐体的区别是该数据体在垂向上与常规数据体相同,均为时间,但每个生成的数据体中只包含单一的频率成分。即对于单一的频率而言,其不同的时间切片上对应不同的离散频率振幅和相位分

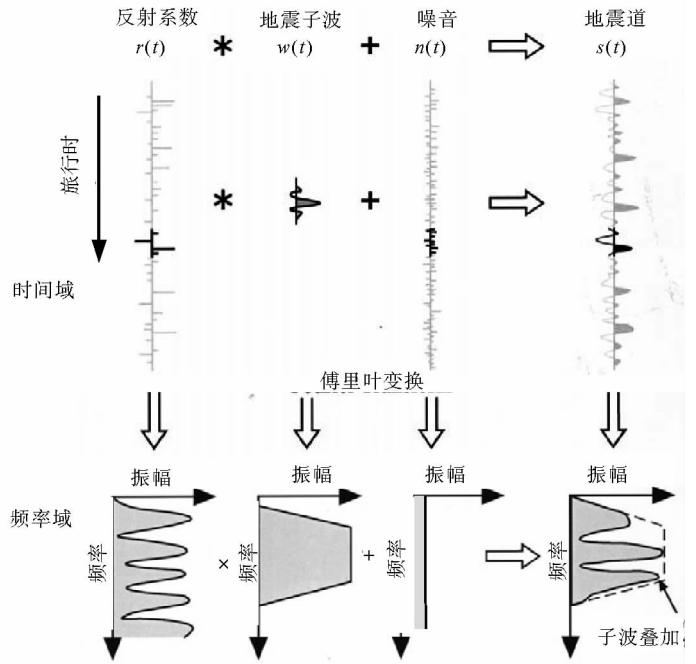


图 1 短时窗的频谱分解及其褶积模型^[5]

Fig. 1 The short-window spectral decomposition and its relationship to the convolutional model

布。通过这种时-频四维体时间切片,解释人员可观察到储层的空间展布,对于储层预测具有良好的指示作用^[4-5]。

从上述分析看,由于通过分频处理可获得常规地震主频不能达到的分辨率,因此,不仅纵向上提高了对薄储层的识别能力,而且横向上也增强了频率的分带性。藉此,本文将其应用于刻画研究区地震储层边界,为地质储层的评价提供更可靠依据。

2 应用实例

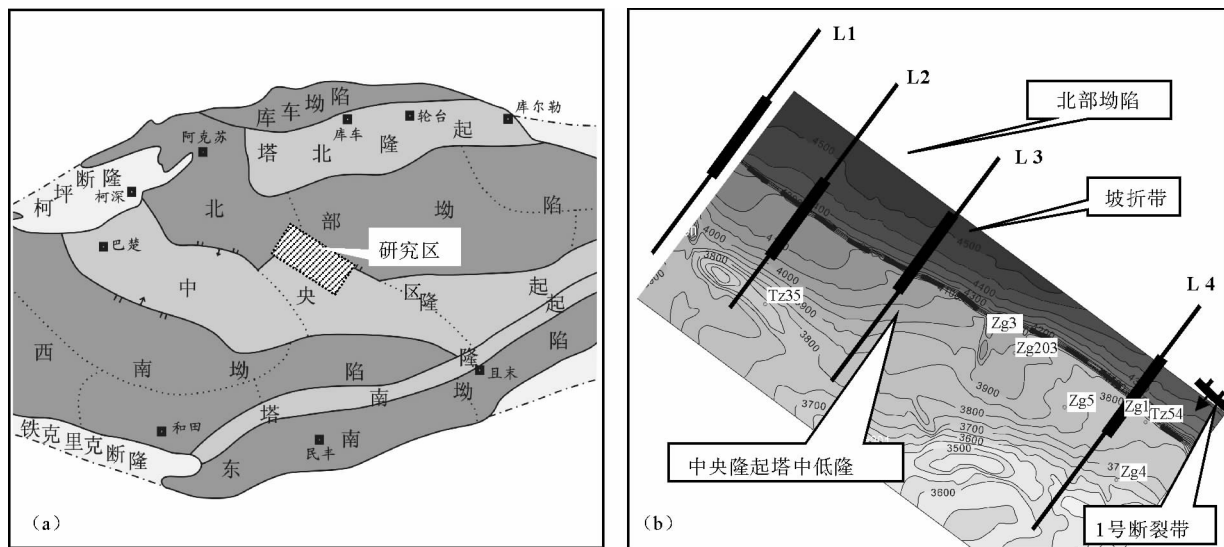
2.1 研究区地质概况

塔中地区位于塔里木盆地中部,地处塔克拉玛干沙漠腹地,区域构造位置上属中央隆起中段的塔中低隆起^[13](图 2(a))。塔中地区总体构造形态为在南北向挤压构造应力作用下形成的近东西向、东高西低,早期活动、晚期相对稳定的继承性古隆起。研究区的构造形态主要表现为南高北低,坡折带位于中央隆起塔中低隆与北部坳陷满加尔凹陷之间,对应于东部地区的 1 号断裂带(图 2(b))。由于研究区不具 1 号断裂带的明显特征,因此,在此称其为坡折带,这是对奥陶系而言。

塔中地区以奥陶系碳酸盐岩为重点目的层的勘探已取得重大突破,即在奥陶系碳酸盐岩中发现了工业油流气的油藏。这些油藏虽然大都受构造背景的控制,但储层的控油作用更加突出。塔中地区奥陶系碳酸盐岩的储层类型主要有三种:裂缝型、溶洞型、裂缝与溶洞(共有)型^[14]。

奥陶系自下而上分为:下统丘里塔格群上亚群蓬莱坝组 and 鹰山组,中统一间房—吐木休克组(大部分地区基本缺失),上统良里塔格组和桑塔木组。以上奥陶统良里塔格组为主的有效储层主要分布于沿塔中 1 号断裂带南侧发育的良里塔格组陆棚边缘高能礁滩相带中,具备形成特大型碳酸盐岩原生岩性油气藏的条件^[15]。

上述认识多来自研究区的南东地区(图 2(b))的勘探开发及相关研究,该区不论是研究程度还是钻探程度都明显高于研究区,已经获得较大的石油勘探突破,取得了较好的社会和经济效益。相对而言,研究区的勘探程度要低得多,主要表现为钻井少,钻遇良里塔格组以下地层的钻井更少(图 2(b))。因此,充分利用地震储层识别技术对研究区进行有效预测,为获取地质储层预测提供有力证据,尤为重要。



(a)塔里木盆地构造单元简图^[13]
(a) The sketch map of Tarim Basin

(b)研究区良里塔格组顶面变化趋势图
(b) The structural surface of LLTG group in interest area

图 2 研究区位置图

Fig. 2 The location of interest area

2.2 技术实现

在探讨研究区储层可能产生的构造、沉积等地质背景前提下,本研究拟订并完成的地震储层边界分析工作主要有两方面内容:一是传统地震属性的提取;二是基于分频技术的频谱分析。

其技术实现的步骤为:第一,选三维工区,利用有限的钻井资料进行层位标定并解释出良里塔格组顶底面,生成三维子体,即目标层段;第二,对良里塔格组目标层段(子体)分别进行地震属性提取和分频处理,分频处理即对生成的目的层段在短时窗内进行离散傅氏变换,生成调谐体;第三,分别对所提取的地震属性和分频处理的结果进行对比分析,初步刻画地震储层边界;第四,结合研究区可能的构造、沉积等地质情况,修改并完善地震储层边界。

2.3 应用效果分析

除了分频处理,本研究还进行了多种地震波动力学特征的分析工作,如均方根振幅、平均瞬时频率及频谱提取等。下面对这些属性的应用效果进行比较。

图3所示为研究区不同位置(上、中、下区段)的四段常规地震剖面,分别为L1、L2、L3及L4;图4则是从该四段典型地震剖面取值并做频谱分析的结果。剖面段所处位置见图2(b)。各剖面中白虚线所夹层(OSQ6),即为良里塔格组。L1、L3及L4三段剖面右侧同为坡折带,但在近坡折带处的良里塔格组组内不仅振幅强弱不一样,而且其主频也明显不同。L1、L3及L4剖面取点处主频分别为12.8、18和13 Hz。L2剖面段频谱取值处稍微离开坡折带,其主频为17.5 Hz。不难看出,L1与L4的主频相近,L2及L3主频相近。

图5(a)是研究区奥陶系良里塔格组顶部的均方根振幅。均方根振幅能反映反射波的强弱,即流体和岩性的变化等。图5(b)是所计算得到的良里塔格组顶部离散频率能量体(13 Hz)。与图5(a)相比,图5(b)所指示的“堤礁”和“坡折带”更加清晰可辨,即由分频处理得到的离散频率能量体分辨率更高。

图6(a)是良里塔格组的平均瞬时频率。平均瞬时频率主要用于检测频率吸收情况。它提供了一种追踪主频的方法,与气体饱和度、地层断裂或岩性及地层改变相联系。在某些环境下,由于相对低密度地层吸收地震高频的作用,常常能引起与均方根振幅异常(亮点或暗点)一致的低平均瞬时频率值。

上述各剖面段中的主频与图6(a)有良好的对应关系。图6(b)是奥陶系良里塔格组的频谱分解图。图6(b)由离散频率振幅所对应的高、中、低频率分带更加清晰。图6(a)和图6(b)中,A与B两区分界都很清楚,但图6(a)中的B与C两区分界明显不如图6(b)。虽然在频谱图上(塔钟低隆,波折带南侧)划分了四个频带,但在靠近一号断裂南侧的视频率相对偏低,这与前人在其他地区的研究认识基本一致。平均瞬时频率分带性虽不及频谱分解的结果,但也存在较好的分带性,这是岩性岩相分带的重要特征。

图6(a)中平均瞬时频率是在长时窗内获得的频谱,由于不同成分频率的相互干扰降低了频率的分带性,即降低了频谱的分辨率。而基于短时窗离散傅氏变换的分频处理可以减少甚至排除时间域内不同频率成份的相互干扰,从而获得高于传统频谱分析分辨率的解释结果。图6(b)所示的离散频率振幅分带与实际钻探及其他有关分析(溶洞等反演预测)等结果更加吻合。图6(a),图6(b)中A区所指示的低频区对应滩-礁组合区,C区所指示的中-低频区对应滩-丘-礁组合,而A区与C区的中间的B区所指示的高-中频区对应藻席-滩组合区。E区为坳陷区,本研究未做储层预测分析。

以图6(b)所指示的离散频率振幅分带为主,对研究区进行了地震储层评价。如图7所示,划分出3个一级分类、5个二级分类的地震储层,即A、C两区属于一等级优选区,B、D两区属于二等级选区,E区属于三等级评价区。细分为A区一等级I-1类优选区(频率最低区),C区为一等级I-2类优选区(频率较低区);D区为二等级II-1类选区(中高低混频区),B区为二等级II-2类选区(中-高频区);III类区为三等级评价区(中高低混频区,这个属性有失真之处,因为该区域良里塔格组的地震反射层很薄,甚至几近为零,所以所提取的调谐体可靠性低),再加上该区属于盆地区,所以不做高评价。

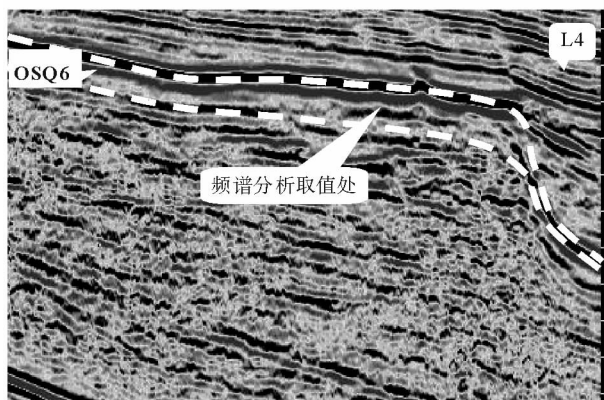
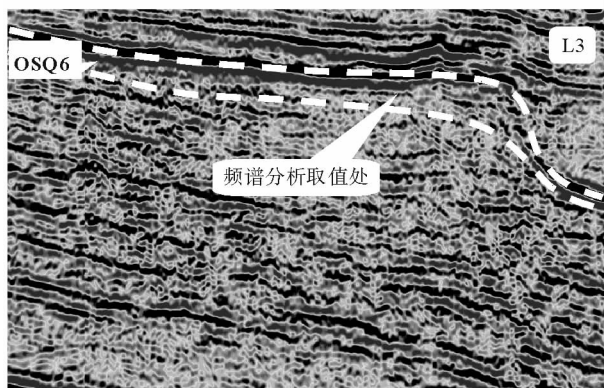
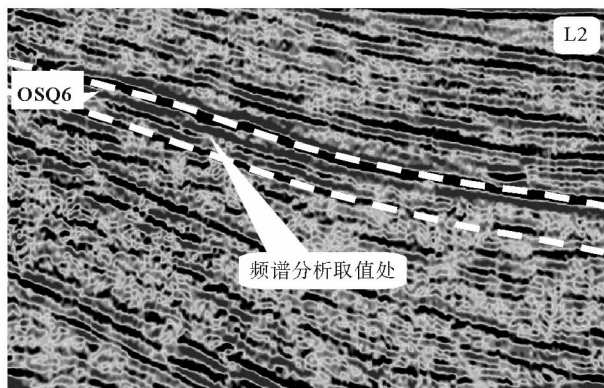
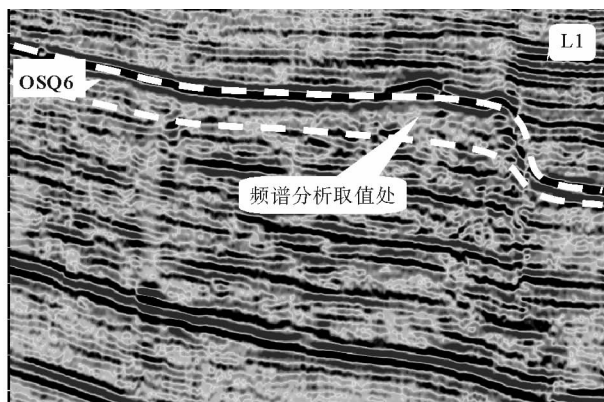


图 3 对应于图 2(b)地震剖面段

Fig. 3 The profiles corresponding to Fig. 2(b)

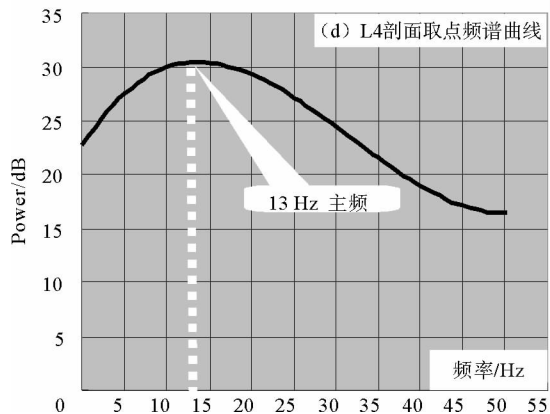
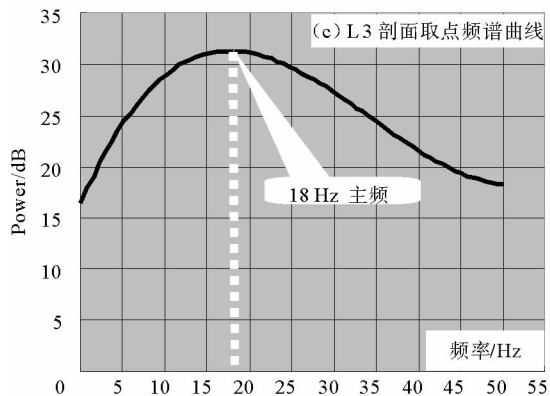
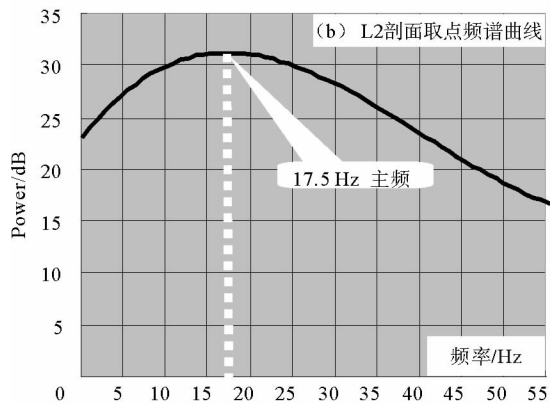
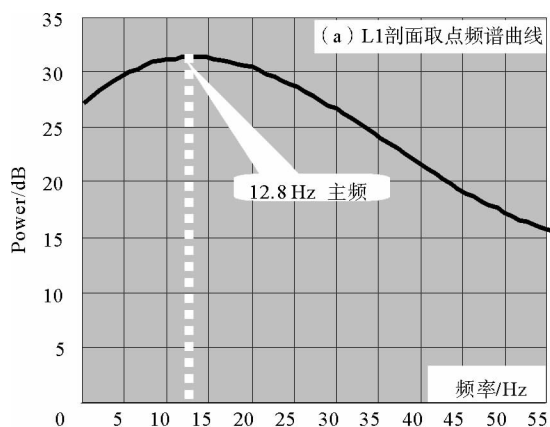
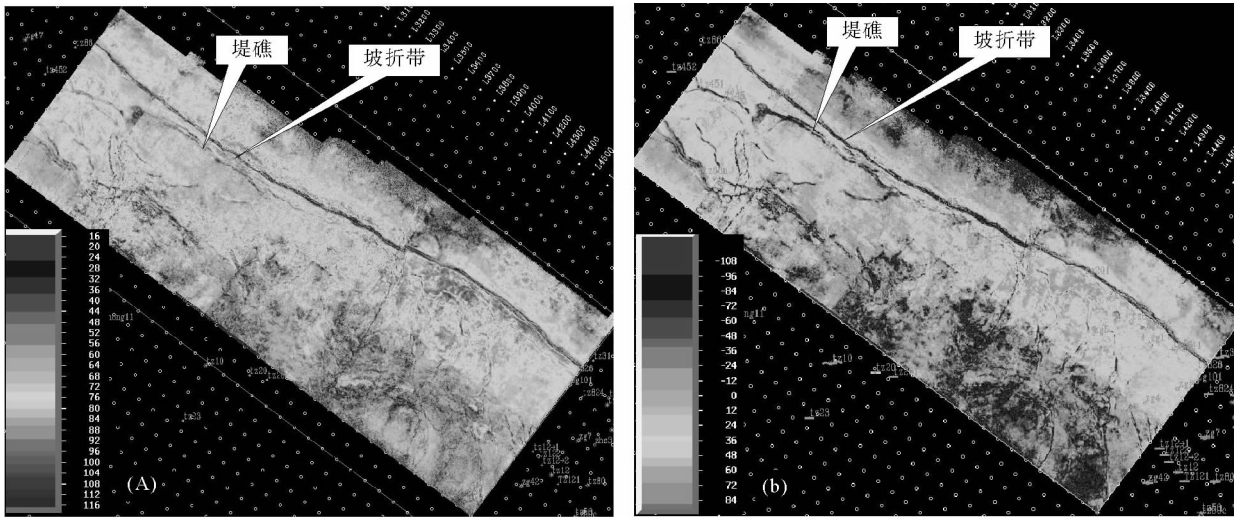


图 4 对应于图 3 中地震剖面段取点频谱曲线

Fig. 4 The spectral curve corresponding to Fig. 3

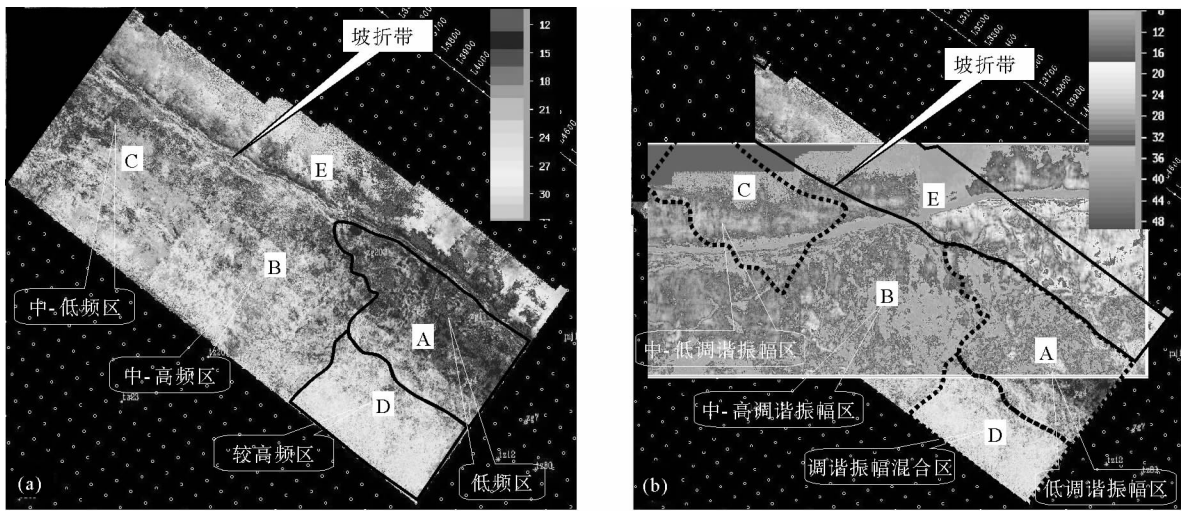


(a) 均方根振幅图
(a) RMS Amplitude

(b) 离散频率能量体 (13 Hz)
(b) 13 Hz energy

图 5 TZ 地区奥陶系良里塔格组顶部区域地震属性

Fig. 5 The seismic attributes of LLTG formation top of Ordovician in TZ district



(a) 瞬时频率图
(a) Instantaneous frequency

(b) 离散频率能量体(30 Hz)
(b) 30 Hz energy

图 6 TZ 地区奥陶系良里塔格组顶部区域地震属性

Fig. 6 The seismic attributes of LLTG formation top of Ordovician in TZ district

上述评价主要是以地震属性,特别是以频谱分解技术为主,依据频率的高低进行的地震储层评价。通常认为低频率区域对应好的储层,因为频率低往往与高孔隙度(低密度),裂缝发育,岩体中含烃类物质等有关。如果结合有效的溶洞预测反演^[16]及礁体分布预测等分析,其评价结果也可能发生变化,特别是一等级优选区中的 A、C 两区的品级可能需要调整一下,因为 C 区溶洞的发育程度要高于 A 区。

3 结论

相对于常规地震属性分析,分频解释技术对目标体具有更高的识别能力,能获得高于常规地震主频等所达不到的分辨率,使频率分带性(对应于离散频率振幅)更加明显,从而能更好地刻画地震储层边界。在塔中

某区的实际应用中,不仅获得了成像效果更好的“堤礁”和“坡折带”,而且得到了分带性更强的离散频率振幅分布图。由离散频率振幅所指示的地震储层边界也更加清晰,地震储层分布预测结果与实际钻探分析数据所得结果基本吻合,为进一步的地质储层评价提供了依据。这是基于短时窗离散傅氏变换的分频处理对减少甚至排除时间域内不同频率成份的相互干扰等作用产生的重要贡献。

致谢:感谢《石油学报》主编赵宗举教授在本论文完成过程中所提供的支持和帮助。感谢金兴、巨朝晖、王焕军、郝继杰、贾凌云、柴慧婵、高登辉、彭杰、任晓芳等同学在本论文完成过程中所做的努力。

参考文献:

[1]TANER M T,KOEHLER F,SHERIFF R E. Complex seismic trace analysis[J]. Geophysics,1979,44(6):1041-1063.

[2]MARPLE S L. Frequency resolution of Fourier and maximum entropy spectral estimates[J]. Geophysics,1982,47(9):1303-1307.

[3]ROBERTSON J D,NOGAMI H A. Complex seismic trace analysis of thin beds[J]. Geophysics,1984,49(4):344-352.

[4]张江华,林承焰,于彦,等. 分频解释技术在岩性储层描述中的应用[J]. 煤田地质与勘探,2008,36(5):70-76.
ZHANG Jianghua,LIN Chengyan,YU Yan,et al. Application of frequency-shared interpretation technique for lithology reservoir description[J]. Coal Geology & Exploration,2008,36(5):70-76.

[5]PARTYKA G,GRIDLEY J,LOPEZ J. Interpretational application of spectral decomposition in reservoir characterization [J]. The Leading Edge,1999,18(3):353-360.

[6]朱庆荣,张越迁,于兴河,等. 分频解释技术在表征储层中的运用[J]. 矿物岩石,2003,23(3):104-108.
ZHU Qingrong,ZHANG Yueqian,YU Xinghe,et al. Application of spectra decomposition to reservoir characterization[J]. Journal of Mineralogy and Petrology,2003,23(3):104-108.

[7]柏冠军,吴汉宁,赵希刚,等. 地震资料预测薄层厚度方法研究与应用[J]. 地球物理学进展,2006,21(2):554-558.
BAI Guanjun,WU Hanning,ZHAO Xigang,et al. Research on prediction of thin bed thickness using seismic data and its application[J]. Progress in Geophysics,2006,21(2):554-558.

[8]常少英,苏丕坡,马红霞,等. TB地区分频成像解释技术研究与应用[J]. 岩性油气藏,2010,22(S):66-68.
CHANG Shaoying,SU Peibo,MA Hongxia,et al. Research and application of frequency division imaging interpretation technology in TB area[J]. Lithologic Reservoirs,2010,22(S):66-68.

[9]龚洪林,王振卿,李录明,等. 应用地震分频技术预测碳酸盐岩储层[J]. 地球物理学进展,2008,23(1):129-135.
GONG Honglin,WANG Zhenqing,Li Luming,et al. Predicting carbonate reservoir by applying seismic spectral decomposition technique[J]. Progress in Geophysics,2008,23(1):129-135.

[10]王西文. 提取地震信号高频信息的方法的若干问题[J]. 石油地球物理勘探,2006,41(1):67-75.
WANG Xiwen. Several issues of methods for detecting high-frequency information of seismic signal[J]. Oil Geophysical Prospecting,2006,41(1):67-75.

[11]吴钦宝,陈同俊,陈凤云. 中国东部煤矿深部开采中的地质勘探技术[J]. 地球物理学进展,2005,20(2):370-373.
WU Qinbao,CHEN Tongjun,CHEN Fengyun. Geological exploration techniques used in deep coal mining in China[J]. Progress in Geophysics,2005,20(2):370-373.

[12]毕俊凤,刘书会,陈学国,等. 分频解释技术在桩106地区馆上段河道砂体描述中的应用[J]. 油气地质与采收率,2003,10(5):38-40.
BI Junfeng,LIU Shuhui,CHEN Xueguo,et al. The application of frequency-shared interpretation technique to channel

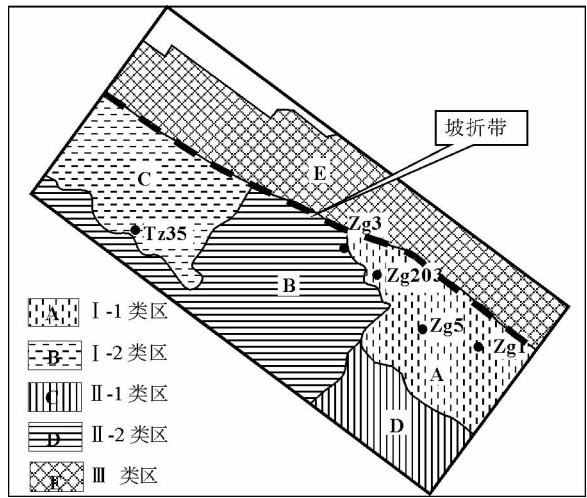


图 7 目标区 LLTG 组地震储层评价图

Fig. 7 The seismic reservoir assessment of LLTG group in interest area

sandbody description in upper Ng of Zhuang 106 area[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2003, 10(5): 38-40.

- [13] 贾承造, 孙龙德, 周新源, 等. 塔里木盆地中新世代构造特征与油气[M]. 石油工业出版社, 2004: 1-11.
- [14] 王志刚. 塔里木盆地塔中地区奥陶系碳酸盐岩缝洞系统预测技术[D]. 北京: 中国地质大学, 2007.
- [15] 赵宗举, 李宇平, 吴兴宁, 等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系特大型岩性油气藏成藏条件及勘探潜力[J]. *中国石油勘探*, 2004, 9(5): 12-20.
- ZHAO Zongju, LI Yuping, WU Xingning, et al. Conditions for migration and accumulation of Ordovician giant lithologic oil and gas reservoirs in Tazhong region and exploration potential[J]. *China Petroleum Exploration*, 2004, 9(5): 12-20.
- [16] 金兴, 林年添, 柴辉焯, 等. 地震数据源的选择对于溶洞有效识别的效果分析[J]. *山东科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 29(1): 29-31.
- JIN Xing, LIN Niantian, CHAI Huichan, et al. Analysis of effect of identifying karst caves with different seismic source data[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Sciences*, 2010, 29(1): 29-31.

(上接第 17 页)

- [16] 金镠, 虞志英, 张志林, 等. 洋山港小洋山西港区回淤问题研究[R]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [17] 恽才兴, 蔡孟喬, 王宝全. 利用卫星像片分析长江入海悬浮泥沙扩散问题[J]. *海洋与湖沼*, 1981, 12(5): 391-401.
- YUN Caixing, CAI Mengyi, WANG Baoquan. An analysis of the diffusion of suspended sediment discharged from the Changjiang River based on the satellite images[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1981, 12(5): 391-401.
- [18] LIU H, HE Q, WANG Z B, et al. Dynamics and spatial variability of near-bottom sediment exchange in the Yangtze Estuary, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 86: 322-330.
- [19] 刘红. 长江河口泥沙混合和交换过程研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [20] 刘家驹, 张镜潮. 淤泥质海岸航道、港池淤积计算方法及其推广应用: 兼论连云港建西大堤后的泥沙问题[J]. *水利水运科学研究*, 1993(4): 301-320.
- LIU Jiaju, ZHANG Jingchao. Siltation prediction for harbour basins navigation on muddy channels and beach[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 1993(4): 301-320.
- [21] 曹祖德, 孔令双. 淤泥质海岸开敞航道的回淤计算[J]. *水道港口*, 2004, 25(2): 59-63.
- CAO Zude, KONG Lingshuang. Siltation calculation for open channel[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2004, 25(2): 59-63.
- [22] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 上海国际航运中心洋山深水港区一、二期工程疏浚区回淤统计材料[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2009.