

天然气水合物储层地震波振幅属性研究

李灿苹¹, 李敏锋²

(1. 广东海洋大学海洋遥感与信息技术实验室, 广东 湛江 524088; 2. 康菲石油中国有限公司, 北京 100027)

摘要: 以实际水合物存在的美国布莱克海台地震数据为例, 利用地震剖面中4个层位(海底层、水合物顶层、水合物层和游离气层)地震数据进行了地震属性的提取及属性分析, 研究了各层位的属性特征。结果表明: 均方根振幅、平均绝对振幅、平均能量变化、振幅峰态、绝对振幅积分、总能量、功率谱最大值、有限带宽能量等8种属性值在各层位的分布情况基本相同, 即海底最高, 其余依次是水合物层、游离气层和水合物顶层, 可区分出水合物层和游离气层。由此, 通过对比各层位的振幅属性值, 可以指示天然气水合物的存在, 为水合物识别及其开采提供参考依据。

关键词: 天然气水合物; 地震属性; 布莱克海台; 属性分析

中图分类号: P 631.4⁺43

文献标志码: A

文章编号: 1673-9159(2011)03-0063-07

Study on Amplitude Attributes of Seismic Wave in Gas Hydrate Reservoir

LI Can-ping¹, LI Min-feng²

(1. Laboratory of Ocean Remote Sensing and Information Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Conocophillips China Co., LTD, Beijing 100027, China)

Abstract: This paper took the seismic data of the actual hydrate existence in American Blake Ridge as an example. By using seismic data in the four layers, namely the sea bottom layer, the top layer of hydrate, the hydrate layer and the free gas layer in seismic section, the seismic attribute extraction was analyzed, and attribute characteristics of every layer was studied. The results showed that eight attributes characteristics in four layers, namely root of mean square amplitude, mean absolute amplitude, mean energy amplitude, variation kurtosis, absolute amplitude integration, total energy, maximum of the power spectrum and the energy in limited band, were similar, and that the attributes in the sea bottom layer were the highest, and decreased in due order in the hydrate layer, the free gas layer and the top layer of hydrate. The hydrate layer and the free gas layer could obviously be distinguished. Therefore, the existence of gas hydrate was indicated by comparing the amplitude attribute values of every layer, and it offered a valuable reference for the hydrate recognition and exploitation.

Key words: gas hydrate; seismic attribute; Black ridge; attribute analysis

天然气水合物(Gas Hydrate或Methane Hydrate)是由水与气体分子(以甲烷为主)在低温高压及气体浓度大于其溶解度条件下形成的貌似冰的结晶状固体物质。天然气水合物广泛存在于海底和陆地永久冻土带, 由于其特殊的生存环境, 1 m³的天然气

水合物可以释放出 164 m³的天然气, 而且单位能量的甲烷燃烧释放出来的温室气体 CO₂ 仅为煤炭的 1/2^[1]。据估算, 世界上天然气水合物所含的有机碳总量相当于全球已知煤、石油和天然气的 2 倍^[2]。天然气水合物具有能量高、分布广、规模大等特点,

收稿日期: 2011-05-24

基金项目: 国家重点基础研究发展 973 计划课题(2009CB219505); 广东海洋大学人才引进专项基金资助(0812182)

第一作者: 李灿苹(1977—), 女, 博士, 讲师, 主要从事散射波地震勘探理论及信号处理方面研究。

被认为是 21 世纪的重要新能源^[3], 因此, 引起世界各国的广泛关注。近年来, 中国在水合物勘探和开采上也投入了大量的资金和人力, 并且取得了一定的进展。我国于 2007 年 5 月 1 日在南海北部成功钻获天然气水合物实物样品, 2008 年 11 月在青藏高原祁连山脉木里地区永久冻土带钻获了水合物实物样品^[1], 这都证实了我国蕴藏有丰富的天然气水合物资源。

目前用于水合物地震识别的技术很多, 如垂直入射的振幅分析与数值模拟^[4]、AVO 反演分析^[5]、速度分析^[6]、旅行时反演(层析成像)^[7]、波形反演^[8-9]、宽带约束反演^[10]、衰减结构分析^[11]、弹性波阻抗反演^[12]、多属性分析判别^[13]和海底多分量地震^[14]等。M. Hato 等^[15]综合利用地震属性识别日本南海海槽天然气水合物。王秀娟等^[16]研究了用地震属性参数识别天然气水合物, 指出综合分析含水合物和游离气沉积层的泊松比、纵波速度和 AVA 特征, 可以识别天然气水合物和游离气在沉积地层中的分布模式。

地震上识别水合物的特征有似海底反射(BSR)标志特征、BSR 强反射界面之上的高速异常带、BSR 附近存在的弱振幅或振幅空白带、AVO 的正负异常和 BSR 的极性反转^[17]。由于天然气水合物的存在与似海底反射、振幅空白、极性反转等地震反射特征并非一一对应, 因此仅以地震反射特征来预测天然气水合物的存在是不精确、不全面的, 其依据是定性的^[18]。当 BSR 和空白带特征不明显时, 刘学伟等提出利用低速背景中近似平行于海底的高速地质体来识别水合物带, 利用纵横波速度信息识别水合物带下游离气^[19]。李敏锋等从基于弹性波波阻抗的 AVO 反演出发^[20], 以纵波波阻抗、横波波阻抗、泊松比等弹性参数为依据, 实现了美国布莱克海台(Blake Ridge) USGS9521 测线上的水合物层和游离气层的准确识别。

本文以实际水合物存在区域美国布莱克海台(Blake ridge)的地震数据为例, 提取了地震剖面中 4 个层位(海底层、水合物顶层、水合物层和游离气层)的地震属性, 并进行了属性分析。通过对比各层位的属性特征, 可以指示天然气水合物的存在, 这为水合物识别及其开采提供了有价值的参考。

1 地震属性参数

地震属性研究起步于 20 世纪 70 年代末, 80 年

代末为迅猛发展阶段, 到 90 年代以后为基本成熟阶段^[21]。地震属性特征是从地震数据中提取出来的有关几何学、运动学、动力学及统计学特征的特殊值, 不同的属性对不同的地质环境以及不同的探测目标有着不同的作用。根据以地震波运动学和动力学为基础以及储层特征对地震属性的分类^[22], 本文提取了与时间域和频率域有关的地震属性。

1.1 时间域振幅属性

根据地震剖面中地震记录 $x(n\Delta t)$, 得到以下时间域地震属性参数^[23]:

1) 均方根振幅。在所选时窗内计算起始时刻和终止时刻内地震记录 $x(n\Delta t)$ 的均方根。

$$A_1 = \sqrt{\frac{1}{n_2 - n_1} \sum_{n=n_1}^{n=n_2} x^2(n\Delta t)}。$$

2) 平均绝对振幅。在所选时窗内计算起始时刻和终止时刻内地震记录 $x(n\Delta t)$ 的平均绝对振幅。

$$A_2 = \frac{\sum_{n=n_1}^{n=n_2} |x(n\Delta t)|}{n_2 - n_1}。$$

3) 平均能量变化。在所选时窗内所有采样点的平均能量(振幅平方)。

$$A_3 = \frac{\sum_{n=n_1}^{n=n_2} x^2(n\Delta t)}{n_2 - n_1}。$$

4) 振幅峰态。所选时窗内所有采样点的振幅四次方之和, 它是振幅相对摆动的量度。

$$A_4 = \sum_{n=n_1}^{n=n_2} x^4(n\Delta t)。$$

5) 绝对振幅积分。所选时窗内所有采样点的振幅绝对值之和。

$$A_5 = \sum_{n=n_1}^{n=n_2} |x(n\Delta t)|。$$

以上各表达式中, Δt 为采样间隔, A_n 表示所提取的第 n 个属性, n_1, n_2 分别为时窗起始和末了位置对应的样点, $n_2 - n_1$ 为时窗内所有采样点数。

1.2 频率域振幅属性

设离散地震信号 $x(n\Delta t)$ 为

$$x(n\Delta t) = (x(0 \cdot \Delta t), x(\Delta t), x(2\Delta t), \dots, x((N-1)\Delta t))。$$

通过离散傅立叶变换,其频谱和频率的计算公式^[24]如下:

$$X(f_m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) e^{-inm2\pi/N},$$

$$f_m = \frac{m}{N\Delta t} \quad (1)$$

式中 $m, n=0, 2, \dots, N-1$, Δt 为时间采样间隔。根据式(1)提取以下频率域地震属性^[23]:

1) 总能量。在所选时窗内振幅的平方和,它与地层的反射系数等因素有关,在含油气范围内,波形总能量一般响应较强,但有时也呈弱响应。

$$A_6 = S = \sum_{n=1}^N X^2(n)。$$

2) 功能谱最大峰值。对应同相轴的峰值,波形为零相位时即主峰值,在含油气范围内主峰一般较大。

$$A_7 = X_{\max} = \max[X(1), X(2), \dots, X(N)]$$

3) 有限带宽能量。给定频率范围内能量。

$$A_8 = \sum_{n=n_1}^{n=n_2} X^2(n)。$$

4) 有限带宽能量比。给定频率范围内能量与频率域总能量的比值。

$$A_9 = \sum_{n=n_1}^{n=n_2} X^2(n) / S。$$

其中, $X(n)$ 为频率域第 n 个样点的振幅, A_n 表示所提取的第 n 个属性, $n_1 = f_1 / df$, $n_2 = f_2 / df$, f_1 和 f_2 为给定频率范围, df 为频率数据间隔。

2 布莱克海台地震数据的实例分析

美国布莱克海台地区是世界上最早探测出水合物的地区之一,抽取该地区一条测线 USGS9521 的地震数据进行研究,图1是该测线进行预处理后所得到的叠加剖面^[25]。

图1剖面上能较清晰地看到指示水合物带存在的 BSR(4.2s 处的反射同相轴),但不太容易判断出水合物带的顶面和游离气层的底面。下面将利用振幅属性来研究水合物层和游离气层的识别。

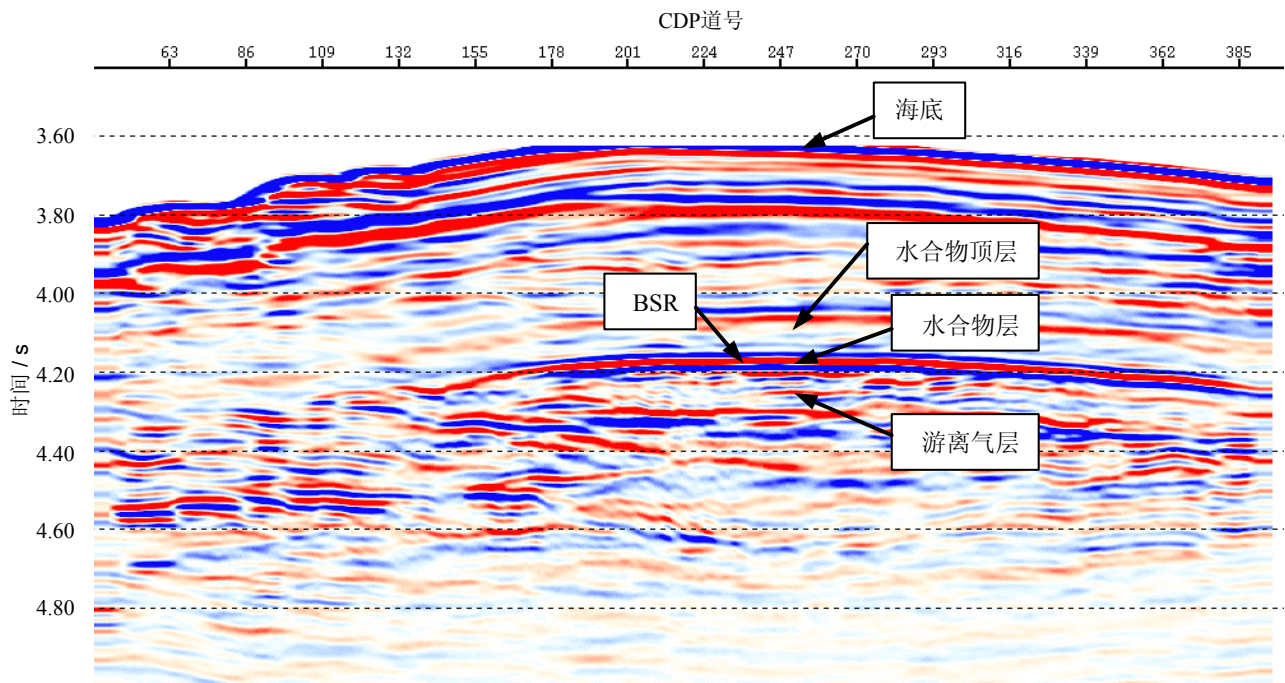


图1 美国布莱克海台 USGS95-1 测线叠加剖面
Fig.1 Poststack section of line USGS95-1 from Blake Ridge

2.1 4个层位振幅谱

抽取图1叠加剖面第250道地震记录,再将该

道分成4个层位,即海底层、水合物顶层、水合物层、游离气层,各层位置见图1标示。各层分别进

行傅立叶变换,得到各层位的频谱,如图2所示。

从图2可以看出,各层位振幅谱能量主要集中在50 Hz以内,最大峰值对应频率较低。海底层和水合物层的有效带宽较大,水合物顶层和游离气层的较小。水合物顶层振幅谱峰值跳动较剧烈,分叉相对较多。由于各层振幅谱能量大致分布在50 Hz以内,所以在2.2中提取有限带宽能量属性时,有限带宽定为50 Hz。

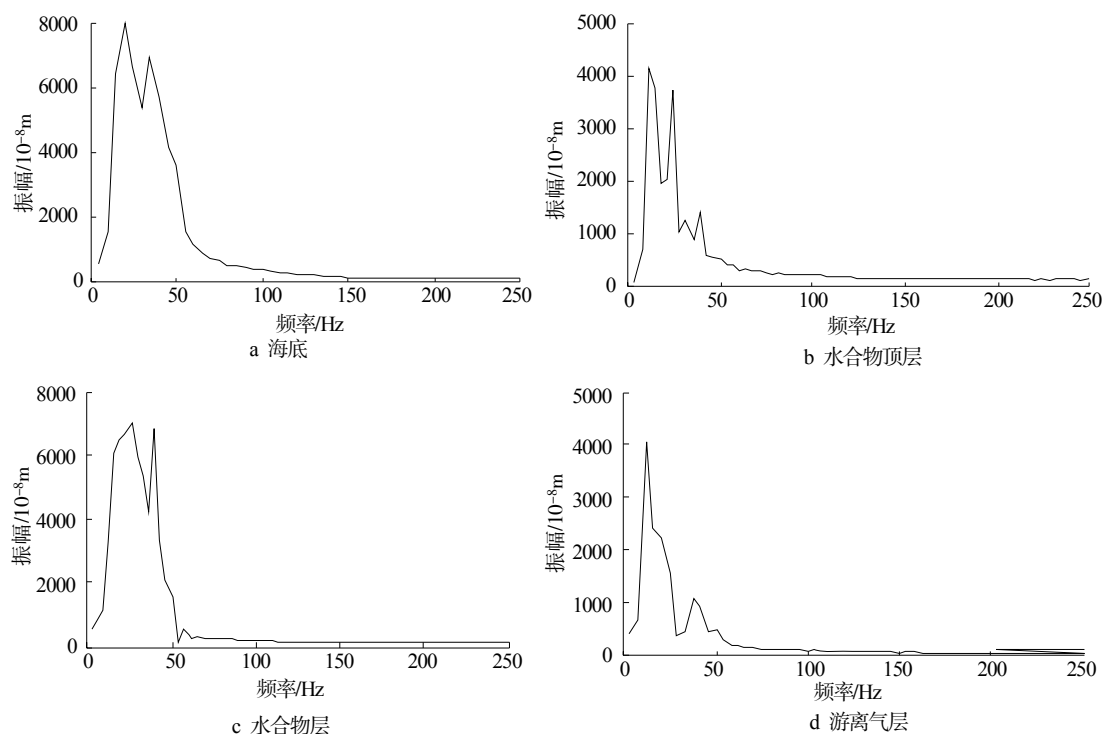


图2 4个层位的振幅谱

Fig.2 The amplitude spectrum of four layers

2.2 地震属性提取及属性分析

提取图1叠加剖面中BSR明显的多道地震数据进行地震属性研究,地震数据 CDP 号从210~250,中间每10道抽取一道,同样,也将每道分成4个层位,即海底层、水合物顶层、水合物层和游离气层,每层均取100个样点。对每层提取以上1.1和1.2中9种地震属性,即均方根振幅、平均绝对振幅、平均能量变化、振幅峰态、绝对振幅积分、总能量、功能谱最大峰值、有限带宽能量和有限带宽能量比,各层每种属性变化情况如图3和4所示。

2.2.1 时间域振幅属性及属性分析 5道4个层位地震数据的5种时间域振幅属性变化情况如图3所示,图3d中纵坐标为振幅峰态值取以10为底对数后的结果。

由图3a可以看出,海底层的均方根振幅最大,其次是水合物层,然后是游离气层,水合物顶层最低,且水合物层和游离气层的均方根振幅相差较大,由此可区分出这两个层位。水合物层振幅大,这是由于富含水合物沉积层与上下地层之间产生

大的波阻抗差,从而在地震记录上产生强振幅。而海底层是海水和海底沉积层之间产生大的波阻抗差,所以振幅能量很强。

由图3b可以看出,各道各层位的平均绝对振幅变化情况与均方根振幅基本相同,即海底层最大,然后依次是水合物层、游离气层和水合物顶层,只是海底层的平均绝对振幅较其他层的大很多,水合物层和游离气层的平均绝对振幅比均方根振幅相差小。

由图3c可以看出,各道各层位的平均能量变化情况与均方根振幅和平均绝对振幅基本相同,即海底层最大,水合物顶层和游离气层较低,水合物层居中,只是海底层的平均能量变化较其他层的大很多,且各道变化较大,游离气层和水合物顶层相差较小。

由图3d可以看出,各道各层位的振幅峰态变化情况与前面属性基本相同,即海底层和水合物层较大,但两层位的属性值相差不大;水合物顶层和游离气层较低,两层位的属性值相差也不大。

从图3 e可以看出,各道各层位的绝对振幅积分变化情况与前面属性相同,即海底层和水合物层较大,水合物顶层和游离气层较小,只是海底层与水合物层的各属性值相差不大。

综合图3中4个层位时间域5个振幅属性的变化特征,可区分出海底层、水合物顶层、水合物层及游离气层。

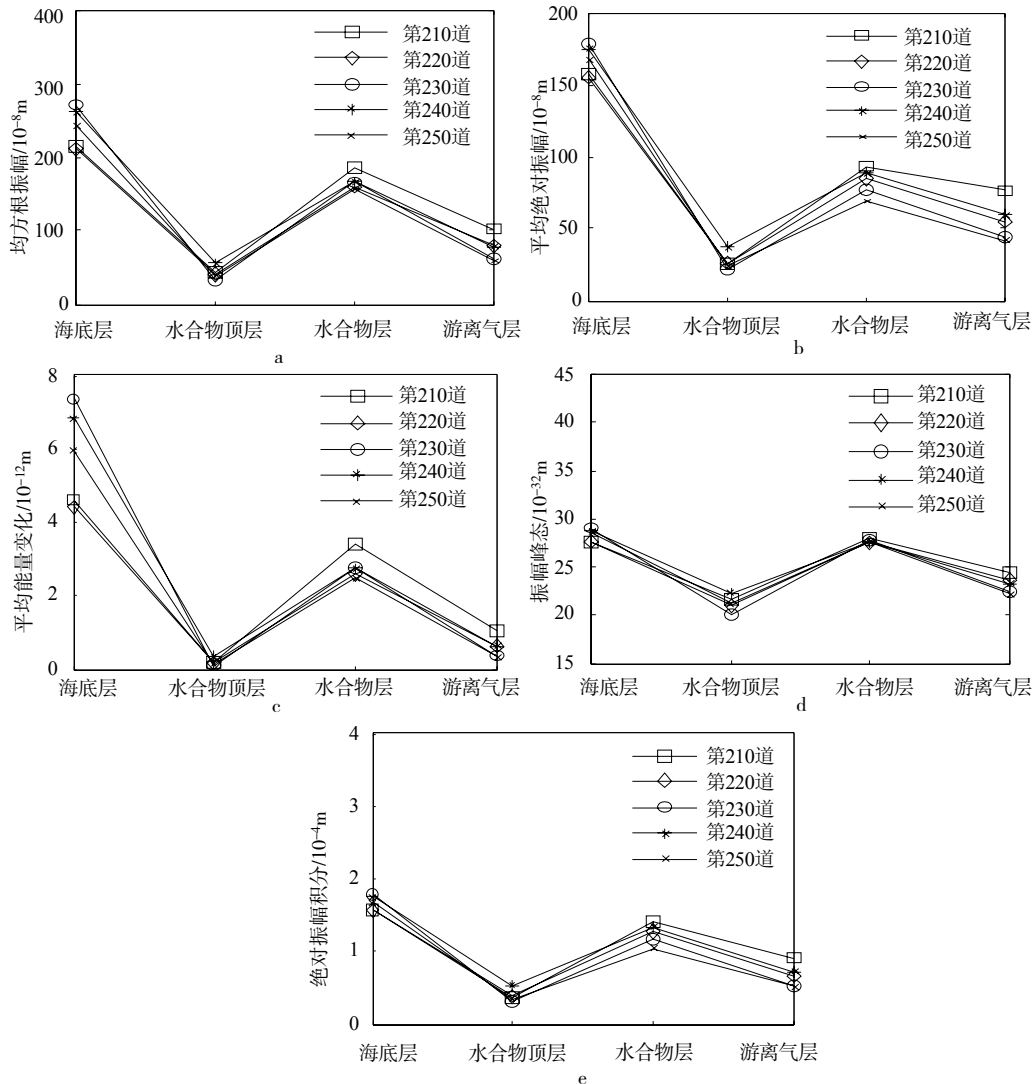


图3 4个层位5种时间域振幅属性

Fig.3 Five kinds of amplitude attributes of four layers in time domain

2.2.2 频率域振幅属性及属性分析 5道4个层位地震数据的4种频率域振幅属性变化情况如图4所示。

从图4 a可以看出,各道各层位的总能量与前面时间域各属性情况相同,即海底层总能量最大,其次分别是水合物层、游离气层和水合物顶层;海底层各道总能量相差较大,游离气层和水合物顶层相差较小,但能区分开。

从图4 b可以看出,各道各层位的功能谱最大峰值与前面属性分布情况基本相同,即水合物层与海底层功能谱最大峰值较大,但两层位相差较小;

水合物顶层和游离气层较低,两层位相差也较小。

从图4 c可以看出,各道各层位的有限带宽能量与功能谱最大峰值分布情况相同,水合物层与海底层有限带宽能量较大,但两层位相差较小,且海底层各道能量相差较大;水合物顶层和游离气层较低,两层位相差也较小。

从图4 d可以看出,各道各层位的有限带宽能量比与前面属性情况差别较大,海底层最低,其他3个层位属性值接近,游离气层较水合物层稍低。因此,与其他属性相比,根据有限带宽能量比这一属性不能明显地区分出各层位,特别是水合物层和

游离气层。

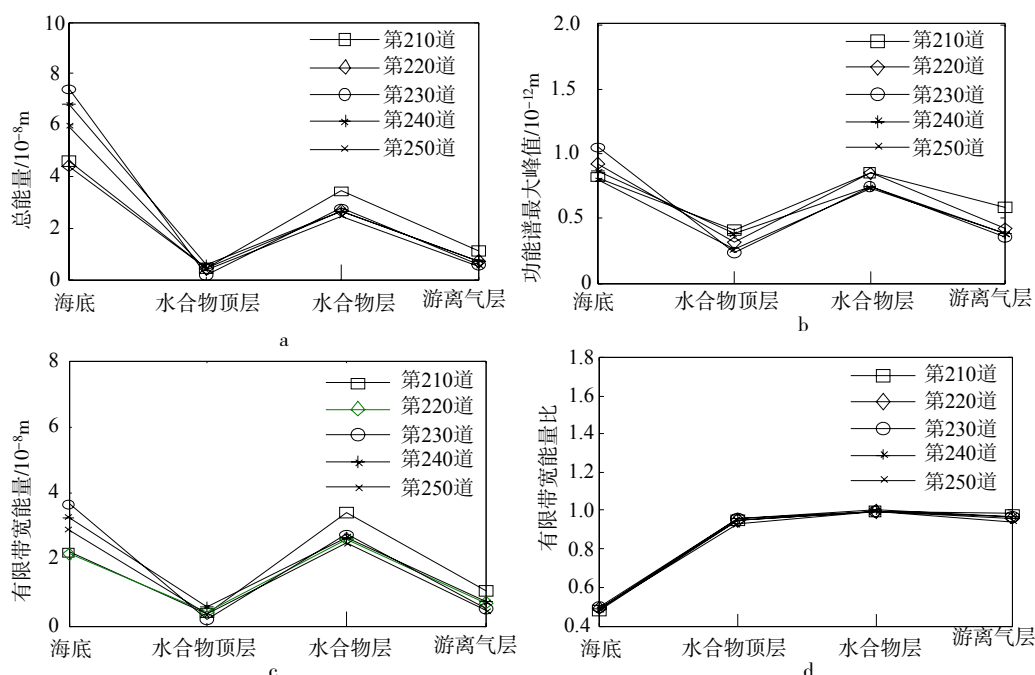


图4 4个层位4种频率域振幅属性

Fig.4 Four kinds of amplitude attributes of four layers in frequency domain

综合图4中4个层位频率域4个振幅属性的变化特征,可区分出海底层、水合物顶层、水合物层及游离气层。

3 结 论

利用已证实并开采天然气水合物的美国布莱克海台地震剖面进行了4个层位(海底层、水合物顶层,水合物层和游离气层)9个地震属性(均方根振幅、平均绝对振幅、平均能量变化、振幅峰态、绝对振幅积分、总能量、功率谱最大值、有限带宽能量及有限带宽能量比)的提取及属性分析,得出以下认识:

1)前8个地震属性在各层位的变化形式基本相同,都是呈“高一低一高一低”分布,即海底层和水合物层较高,水合物顶层和游离气层较低。

2)海底层的均方根振幅、平均绝对振幅、平均能量变化及总能量较水合物层高,由此可区分出海底层和水合物层。

3)游离气层的前8个振幅属性值比水合物顶层略高,由此可区分出游离气层和水合物顶层。

4)水合物层的前8个振幅属性值都比游离气层高,且相差较大,由此可区分出水合物层和游离

气层。

由此,通过以上提取的9个地震属性可区分出海底层、水合物顶层、水合物层和游离气层。当然,本研究是以实际存在水合物的地震数据为例进行的,当BSR缺失或水合物信息完全未知时,此结论和认识也可以为天然气水合物的识别提供思路和参考,这正是下一步的研究方向。

本文中的实际地震数据由Tinivella先生提供,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 张永勤. 国外天然气水合物勘探现状及我国水合物勘探进展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(10): 1-8.
- [2] 张俊霞, 任建业. 天然气水合物研究中的几个重要问题[J]. 地质科技情报, 2001, 20(1): 44-48.
- [3] 胡中平, 孙建国, 赵群. 利用地震方法识别天然气水合物[J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(6): 23-26.
- [4] Holbrook W S, Hoshing H, Wood W T, et al. The leg 164 Science seismic profiling [J]. Science, 1996, 273(5): 1 840-1 843.
- [5] Karin A, Patrick E H, Mary M. Amplitude versus of f set modeling of the bottom simulating reflect ion associated with submarine gas hydrates [J]. Marine Geology, 1997, 137(1): 25-40.

- [6] Dai J C, Xu H B, Fred S, et al. Detection and estimation of gas hydrates using rock physics and seismic inversion: Examples from the northern deep water Gulf of Mexico[J]. The leading edge, 2004, 23(1): 60-70.
- [7] 宋海斌, 江为为, 张文生, 等. 天然气水合物的海洋地球物理研究进展[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 224-229.
- [8] Singh S C, Minshull T A, Spence C D. velocity structure of a gas hydrate reflector [J]. Science, 1993, 260(1): 204-207.
- [9] Singh S C, Minshull T A. Velocity structure of a gas hydrate reflector at Ocean Drilling Program site 889 from a global seismic waveform inversion[J]. J Geophysics Res, 1994, 99(6): 24 221-24 233.
- [10] Lu S M, George A M. Estimation of gas hydrate and free gas saturation, concentration, and distribution from seismic data[J]. Geophysics, 2002, 67(2): 582- 593.
- [11] 张聿文, 刘学伟, 金玉洁. 含天然气水合物地层的速度和衰减研究[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(2): 205-214.
- [12] Lu S M, George A M. Elastic impedance inversion of multi-channel seismic data from unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas [J]. Geophysics, 2004, 69(1): 164-179.
- [13] Hato M, Matsuoka T, Inamori T, et al. Detection of methane hydrate bearing zones using seismic attributes analysis [J]. The leading edge, 2006, 25(5): 607-609.
- [14] Milo M B, Paul E M, Bob A H, et al. High resolution multi-component seismic imaging of deep water gas hydrate systems [J]. The leading edge, 2006, 25(5): 578-596.
- [15] Fin k C P, Spence C d. Hydrate distribution off Vancouver Island from Multifrequency single channel seismic reflection data[J]. J Geophys Res, 1999, 104(5): 2 909-2-922.
- [16] 王秀娟, 吴时国, 徐宁. 地震属性参数在识别天然气水合物和游离气分布模式中的应用[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37 (5): 271-279.
- [17] 黄兴文, 陈建阳, 于兴河, 等. 然气水合物的地震识别方法及研究趋势[J]. 天然气工业, 2005, 25 (3): 58-60.
- [18] 徐华宁, 梁蓓雯, 张光学, 等. 南海北部陆坡天然气水合物地震识别研究[J]. 天然气工业, 2006, 26 (9): 49-51.
- [19] 刘学伟, 李敏锋. 张聿文天然气水合物地震响应研究——中国南海 HD152 测线应用实例[J]. 现代地质, 2005, 19 (1): 33-38.
- [20] 李敏锋, 刘学伟, 白杰, 等. 天然气水合物层和游离气层的地震反演识别——布莱克海台 USGS9521 测线应用实例[J]. 现代地质, 2007, 21(1): 105-110.
- [21] 曹辉. 地震属性应用中几个关键问题的探讨[J]. 石油物探, 2004, 43(增刊): 1-3.
- [22] 庄东海. 地震属性技术与四维地震方法研究及应用[D]. 北京: 中国地质大学, 1999.
- [23] 邹才能, 张 颖. 油气勘探开发实用地震新技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [24] 胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 155-157.
- [25] 李敏锋, 李灿苹, 刘学伟, 等. 基于连续小波变换的天然气水合物层地震数据多尺度分析——布莱克海台 USGS9521 测线应用实例[J]. 现代地质, 2006, 20(1): 109-114.