

基于连续小波变换的天然水合物层地震数据多尺度分析

——布莱克海台 USGS95-1 测线应用实例

李敏锋, 李灿苹, 刘学伟, 杨 丽

(中国地质大学 地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

摘要: 似海底反射 (BSR) 是目前天然气水合物层识别的主要依据, 但是当 BSR 不明显或者缺失的时候怎样识别水合物层, 以及水合物层顶面和下伏游离气层底面如何确定, 仍然是水合物识别中难以圆满解决的两大难题。以布莱克海台 USGS95-1 测线地震数据为例利用小波变换进行多尺度研究发现水合物层和游离气层表现出不同的尺度特征: 水合物层表现出大尺度特征, 而游离气层具有小尺度特征; 在最佳尺度剖面上, 水合物层表现为低尺度背景中的近似平行于海底的高尺度带。利用水合物层和游离气层的这种尺度差异不但可以识别水合物层, 而且还可以推断水合物层的顶面和游离气层的底面。

关键词: 天然气水合物; 小波变换; 似海底反射; 最佳尺度; 游离气; 布莱克海台

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8527(2006)01-0109-06

Multi-scale Study of Seismic Data from Sediments Containing Gas Hydrates Based on Continuous Wavelet Transform: A Case Study of Line USGS95-1 in Blake Ridge

LIM in-feng LI Can-ping LIU Xue-wei YANG Li

(School of Geophysics and Technology Information, China University of Geosciences Beijing 100083, China)

Abstract Bottom simulating reflector (BSR) is the main indicator of gas hydrates. However, there are still two problems which are not successfully solved up to now in identification of gas hydrate: one is how to identify hydrate sediments when BSR is not clear or not in existence on seismic sections, and the other is how to recognize the top of the hydrate layer and the bottom of the free gas layer. In this paper, the seismic data of line USGS95-1 in Blake Ridge are studied through wavelet multi-scale method to show that wavelet scales of seismic data from hydrate sediments are larger than the ones of the data from free gas layer. Moreover, the gas hydrate layer on optimal-scale section shows a high scale zone of paralleling bottom in the low scale background. This difference in wavelet scales of seismic data between gas hydrate sediments and free gas area can be used not only to recognize gas hydrates, but also to distinguish the top of the hydrate layer and the bottom of the free gas layer.

Key words gas hydrate; wavelet transform; bottom simulating reflector; optimal scale; free gas; Blake Ridge

0 引 言

天然气水合物被视为传统能源的理想替代品, 其识别方法的研究已成为水合物勘探工作的热点之一。近年来, 中国在这方面也投入了大量的资金和人力, 并且取得了一定的进展。至今正在研

究和使用的天然气水合物识别技术主要有地球化学^[1-4]、热释光识别^[5]、热流异常识别^[6]、热红外探测^[7-8]等非地震勘探方法和似海底反射 (BSR) 特征识别^[9-11]、属性参数识别^[12-13]、物性参数识别^[14]等地震勘探方法。在所有这些方法中, 地震剖面上的 BSR 特征仍是其中最主要、最直接的依

收稿日期: 2005-10-08; 改回日期: 2005-12-16 责任编辑: 潘令枝。
基金项目: 国家“863”计划项目 (2001AA611020); 国家重点基础研究发展规划项目 (G20000467)。
作者简介: 李敏锋, 男, 博士研究生, 1978 年出生, 地球探测与信息技术专业, 主要从事天然气水合物的地震勘探与识别方面的研究。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

据。但近年来的研究和实际工作也发现, 这些方法并不能完全满足水合物识别工作的要求。就 BSR 识别方法而言, 仍具有以下不足之处: (1) BSR 的存在可以作为水合物层的存在标志, 但水合物层的顶面和游离气层的底面怎么确定, 怎样准确地判断出水合物层和游离气层的分布区域, 这些问题无法得到圆满的解决; (2) 水合物层及其下伏游离气层的存在与 BSR 特征之间并不是一一对应的关系, 也就是说水合物层和游离气层的存在并不一定意味着地震剖面上存在 BSR 特征^[12]; (3) 地下构造等各种情况的复杂性和特殊性加大了 BSR 识别的难度, BSR 在地震剖面上可能会很不明显。

本文通过对实际水合物存在区域美国布莱克海台 (Blake Ridge) 的地震数据利用小波变换进行多尺度分析发现: (1) 和水饱和地层相比, 水合物层和游离气层的地震数据变换后表现出不同的尺度特征 (前者为大尺度特征, 后者表现出小尺度特征), 利用这一特征差异可以识别水合物层和游离气层; (2) 由于小波分析具有很强的时间定位能力, 在一定的尺度范围内, 小波变换后的频谱剖面上可以突出水合物层和游离气层的相边界、水合物分布带的顶界面以及游离气层的底界面。

1 地震信号的小波分析原理

1.1 地震道信号的小波变换原理

对于一个地震道信号来说, 如果将其看成一维信号, 设为 $f(t)$, 则该信号的小波变换可以写成:

$$C_{ab} = (CWT_{\psi}f)(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\Psi}_{ab}(t) dt$$

其中, 函数 $\overline{\Psi}_{ab}(t)$ 的共轭函数

$$\Psi_{ab}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi(\frac{t-b}{a}) \quad a \in R, a \neq 0, b \in R$$

就是小波函数, 也称之为小波, 它所对应的原函数 $\Psi(t)$ 就是母小波; a 是伸缩尺度参数; b 是时间平移参数。可以看出小波是由母小波经过不同的时间尺度伸缩和不同的时间平移得到的。大的 a 值对应的小波 $\Psi_{ab}(t)$ 伸展较宽; 小的 a 值对应的小波在时间轴上受到压缩。不同的 b 值表示小波沿时间轴移动到不同的位置。研究水合物层和游离气层的多尺度特性主要是分析伸缩尺度参数 a 的变化特征。

1.2 地震信号的多尺度分析

图 1 展示了利用不同尺度小波对地震道信号进行变换的原理。对于伸缩尺度参数 a 来说, 小的 a

值对应的小波主频高; 大的 a 值对应的小波主频低^[15]。小波变换后的小波级数系数反映的是信号与小波之间的相关度: 小波级数系数绝对值越大说明两者之间相关性越好。由此可以通过不同尺度的小波级数系数来分析信号的尺度特征^[15-17]。

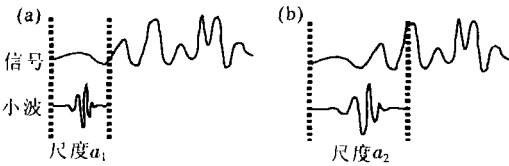


图 1 地震道信号小波变换原理

Fig. 1 Theory of wavelet transform of seismic trace

对于水合物带和游离气带来说, 利用小波变换结果对数据进行分析的主要依据是: (1) 由于小波变换具有时间定位能力和突出局部变化的特点^[16-18], 所以在变换后所得到的结果上能更加清楚地显示出 BSR 所对应的弹性界面; (2) 根据小波变换的这一特点, 虽然水合物带顶界面一般来说在地震剖面上很不明显, 但在小波变换后的系数剖面上却有可能清楚地显示出来; (3) 经分析发现, 水合物带和游离气带具有不同的尺度特征 (水合物带内部反射同相轴很弱, 一般来说与大尺度小波拟合较好, 而游离气层刚好与之相反)。因此, 即使水合物带的顶、底界面都难以在地震剖面上辨别, 利用小波变换方法也可能将水合物带和游离气带划分出来。

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, 其水合物发育区的沉积地层未固结成岩, 孔隙度比较大^[19]。该地区的两条测线 (BT-1 和 USGS95-1) 的地震数据是由美国的 GSI 公司于 1974 年采集得到。后来的 ODP164 航次在该处所钻的 3 口井 (994、995 和 997 井) 均证实了水合物的存在^[20]。本文采用 USGS95-1 测线数据进行研究。

2.1 地震数据预处理

地震数据预处理的主要目标是保持和恢复道间的振幅关系、改善数据质量和提高信噪比、使反射界面正确归位^[12]。测线 USGS95-1 的目标层 (水合物层和游离气层) 深度浅, 因此与目标层反射波到达时间相比, 多次波到达晚, 所以不需要消除多次波; 其次该地区反射界面比较水平, DMO 处理的作

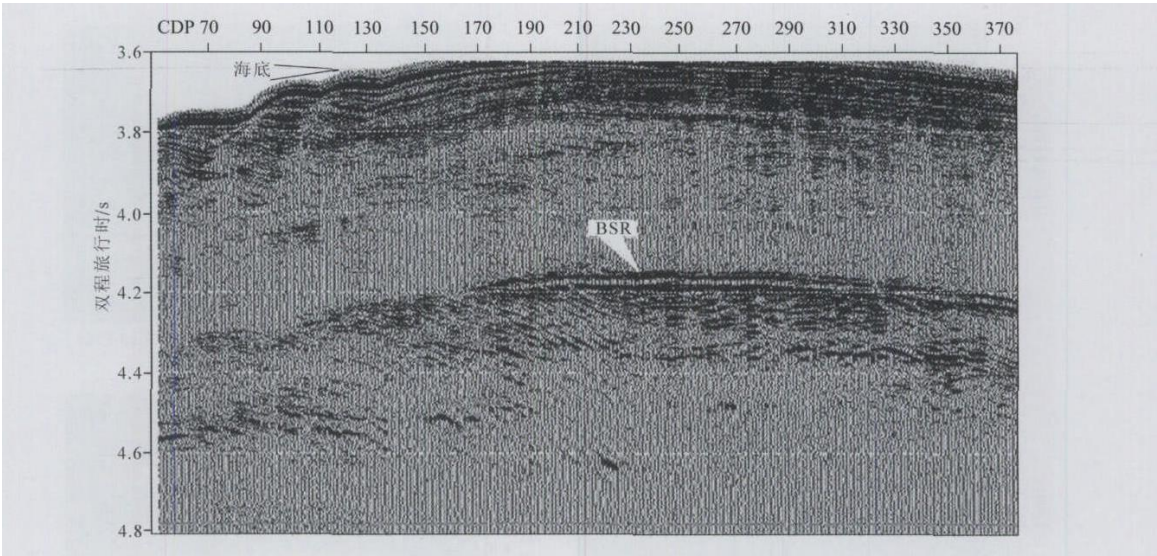


图 2 美国布莱克海台 USGS95-1测线叠加剖面
Fig. 2 Poststack section of line USGS95-1 from Blake Ridge

用非常小。所以对该测线所进行的预处理步骤主要有：振幅保真处理；球面扩散补偿；地表一致性振幅恢复；地表一致性剩余静校正；地表一致性反褶积和 0~50 Hz 低通滤波处理等。图 2 是对该测线处理后所得到的叠加剖面。

从该剖面上能比较清楚地看到指示水合物带存在的 BSR (4.2 s 处的反射同相轴)，但是从该剖面上不太容易判断水合物带的顶面和游离气层的底面。

2.2 CDP 道集的多尺度分析

笔者抽取了 CDP 号为 250 的叠前 CDP 道集 (图 3) 进行分析。利用 Mexican Hat 母小波来构建不同尺度的小波。图 4 是利用这些不同尺度的小波对该 CDP 道集进行变换后得到的小波级数系数。其中，图 4 中的 (a)、(b)、(c)、(d) 分别对应的小波尺

度为 11、21、27、45。首先观察图中显示的 BSR (接近 4.2 s 处) 特征，可以看出只要尺度参数选择合适 (图 4 中的 (a)、(b) 和 (c))，BSR 对应的界面在小波级数系数剖面上的显示非常明显。而且和海底相比，该同相轴明显地表现出反极性特征：海底主瓣为黄/红色，而 BSR 对应的同相轴主瓣为蓝色。海底是波阻抗增大的界面，这也就是说 BSR 对应的界面是波阻抗减小的分界面。这与水合物层和游离气层的弹性分界面的特征是完全一致的^[21-22]。而许多有关布莱克海台地区水合物的研究工作也证实该地区水合物层之下是游离气层。另外，在图 4 中的 (a) 和 (b) 中，可以看出水合物层顶界面特征在接近 3.8 s 处都有比较明显的同相轴，从该同相轴所表现出来的极性特征 (和海底相同)，初步推断它对应水合物层的顶界面。

综上所述，通过对 CDP 道集采用不同尺度的小波进行变化，可以得到以下结论：(1) 只要尺度参数选择合适，变换后的小波级数系数剖面上就能明显地显示出水合物层和游离气层的弹性分界面，并且该界面对应的同相轴的极性和海底反射的极性相反；(2) 虽然叠加剖面上水合物层的顶面不明显，但在一定尺度参数范围内，该界面在小波级数系数剖面上却可以清楚地显示出来。

2.3 叠加道的多尺度分析

与叠前分析相似，首先对各叠加道进行多尺度分析。图 5 显示了 CDP 250 叠加道不同尺度的变换结果，从图中可以看出，对某一固定时移参

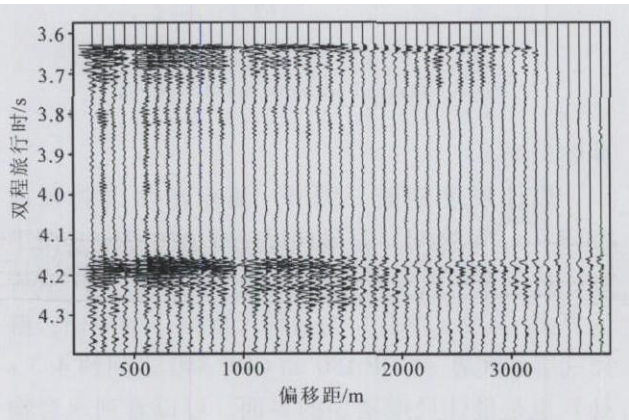
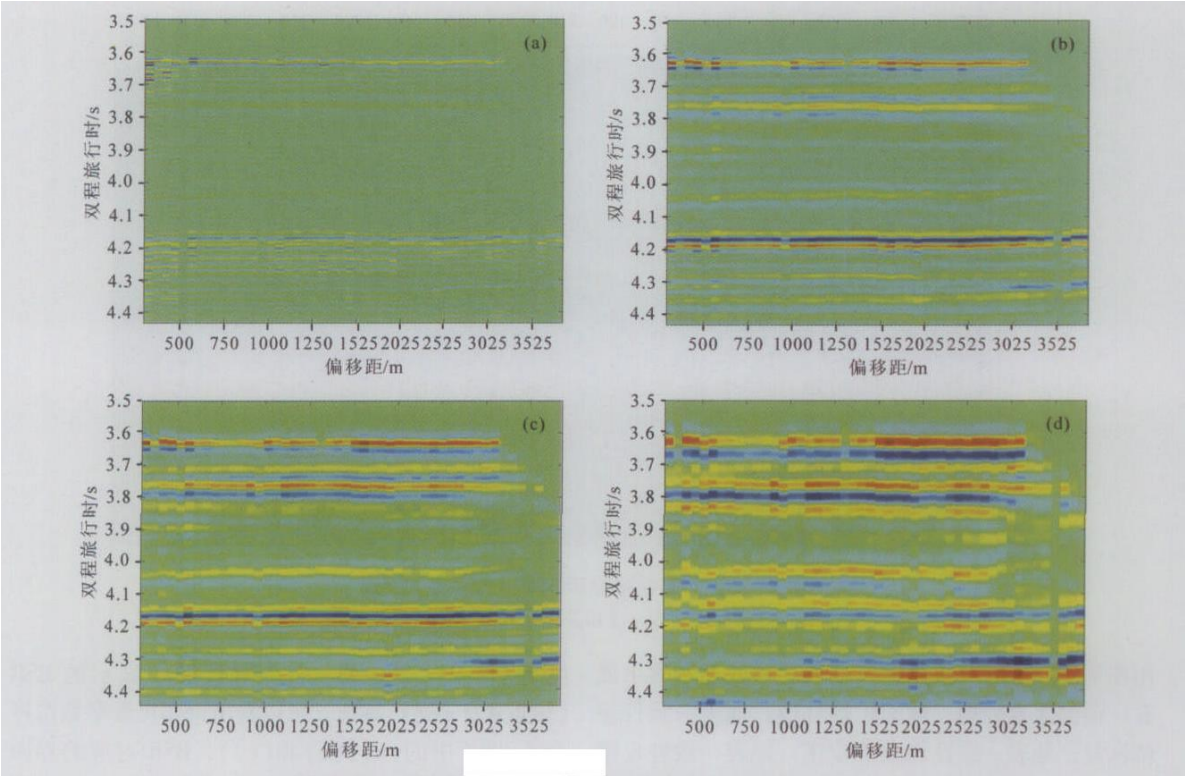


图 3 USGS95-1 测线 CDP 250 叠前道集

Fig. 3 The prestack gather from CDP 250 in line USGS95-1



(a)小波尺度为 11; (b)小波尺度为 21; (c)小波尺度为 27; (d)小波尺度为 45

图 4 USGS95-1测线 CDP 250的小波级数系数剖面

Fig. 4 Sections of wavelet coefficients from CDP 250 in line USGS95-1

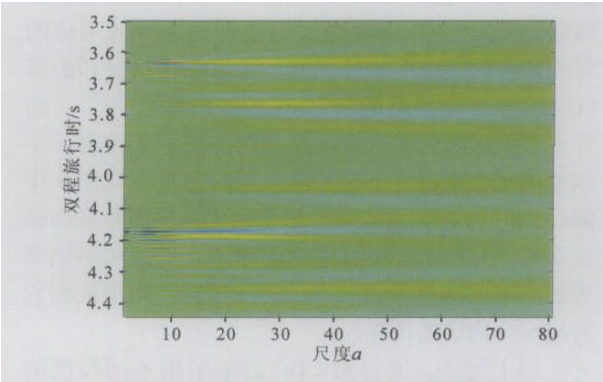


图 5 CDP 250叠加道的小波级数系数

Fig. 5 Section of wavelet coefficients from stacked CDP 250

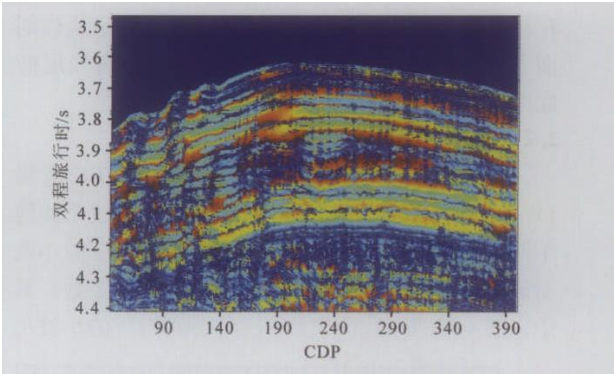


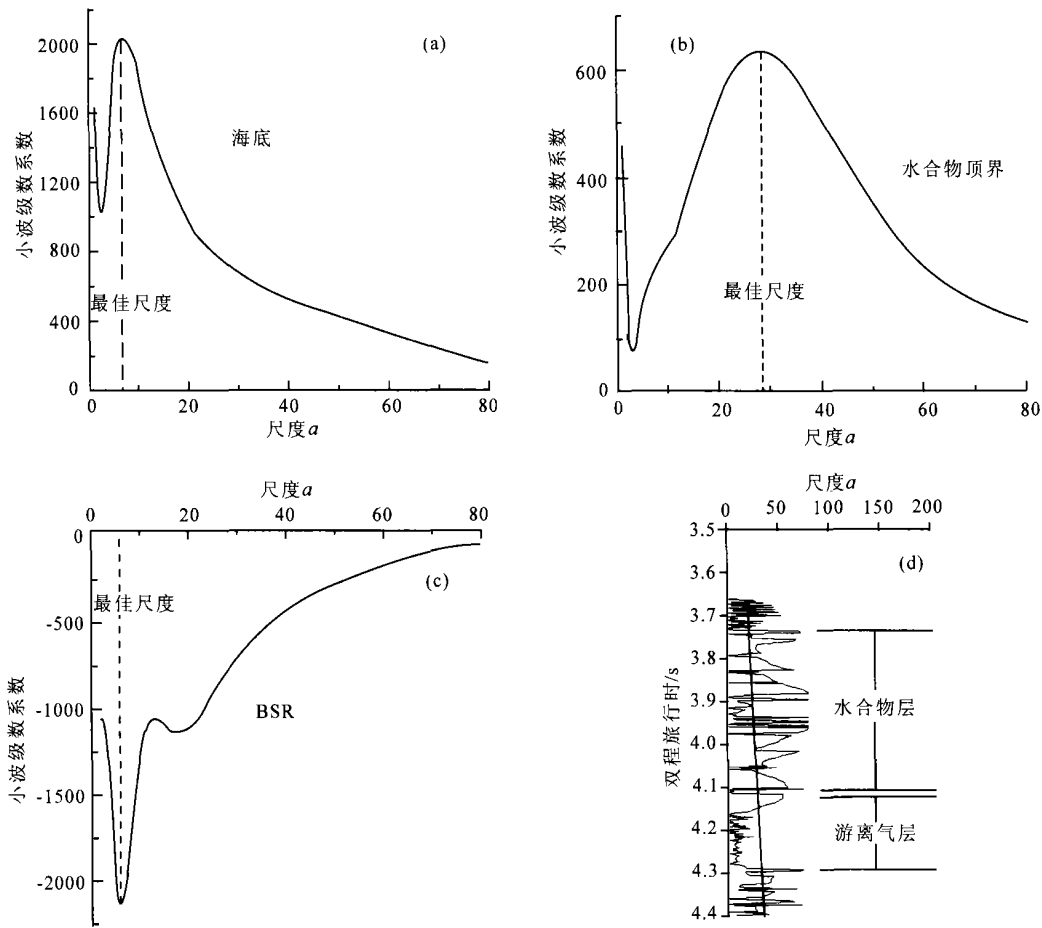
图 6 USGS95-1测线的最佳尺度

Fig. 6 Optimal scales of line USGS95-1

数来说,不同尺度对应的小波级数系数不同,并且小波级数系数的绝对值具有单峰值特征。单峰值特征说明只有在该峰值附近,小波和信号的相关性好。针对该特征,对每个叠加道各个时刻都拾取了小波级数系数峰值对应的小波尺度,得到了最佳尺度剖面(图6)。具体来说,对每一个叠加道拾取最佳尺度的过程如下:针对每个时移参数都进行多尺度变换;找出绝对值最大的小波级数系数所对应的尺度,即时移参数所对应的最佳

伸缩尺度。

最佳尺度剖面(图6)显示出水合物顶面(3.8~3.9 s之间)是最佳尺度增加的界面(图中红、黄色表示大尺度,蓝色是小尺度);BSR对应的界面(4.2 s左右)为最佳尺度减小的界面;游离气层的底界(CDP 180和 CDP 340之间约 4.3 s处)也是最佳尺度增加的界面。可以看到水合物层内部也有一些最佳尺度减小的部位,这可能是由于水合物分布不均匀造成的。另外,从图6中



(a) 对应图 5 中海底 (约 3.65 s); (b) 对应图 5 中水合物层顶界面 (约 3.76 s); (c) 对应图 5 中 BSR 界面 (约 4.15 s); (d) CDP 250 提取最佳尺度后得到的最佳尺度曲线 (斜线表示水饱和地层的最佳尺度变化趋势)

图 7 USGS95-1 测线 CDP 250 叠加道的小波级数系数随尺度的变化曲线和最佳尺度

Fig. 7 Optimal scales from stacked CDP 250

还可以看出显示的水合物层几乎和海底是平行的。由此可以将水合物层在最佳尺度剖面上的识别归结为低尺度背景中近似平行于海底的高尺度带是水合物带的特征。

小波级数系数反映了小波与对应时刻信号的相关度，因此最佳尺度也就反映了该时刻信号的尺度特征。图 7 是单独抽取 CDP 250 叠加道进行尺度分析的结果，其中，图 7 中的 (a)、(b) 和 (c) 分别对应海底、水合物层顶面和 BSR 的不同尺度小波级数系数，最佳尺度对应小波级数系数绝对值的峰值。对 CDP 250 叠加道每个时刻都提取它的最佳尺度，就得到图 7 (d) 所示的最佳尺度曲线。从该曲线上可以清楚地看到 CDP 250 道所在位置的水合物层顶面 (约 3.76 s)、BSR 对应的界面 (约 4.15 s) 和游离气层的底面 (约 4.3 s)。继而可以推断该 CDP 位置水合物层和游离气层的时间厚度分别约为 0.34 s 和 0.15 s (双程旅行时)。

近年来 Blake 海台地区含水合物地层研究的其他实际资料和处理结果也都证实了上述对水合物层顶、底面和游离气层底面推断的正确性。比如根据 AVO 反演得到的速度和密度等物性参数数据^[14]和 ODP164 航次所钻的 3 口井资料^[20]所推断出来的这些界面位置和本文的结论都是基本吻合的。

通过上述分析，可以得到以下结论：(1) 最佳尺度剖面能显示出水合物层的顶面和底面，能显示出游离气层的底面；(2) 在最佳尺度剖面上，水合物层表现为高尺度特征，游离气层为低尺度特征；水合物层是平行于海底的高尺度带，该特征指示了水合物层的存在。

2.4 多尺度分析的岩性和地质解释

天然气水合物和游离气在沉积层中的发育改变了原来地层的岩性特征。这种岩性差异使得地震波在这两种地层中的反射特征发生了变化：水合物层的反射能量弱，形成所谓的空白带，且反射波的高

频成分相对缺失,因此具有高尺度(低频)特征,而游离气层与之相反,形成低尺度区域。此外,水合物的生成受温度和压力的影响,而一般来说等温面和等压面近似平行于海底,所以水合物带也就近似平行于海底。这样就形成了上述对应于水合物带的近似平行于海底的高尺度带。

3 结 论

天然气水合物层和游离气层的地震识别除了依据 BSR 特征以外,还可以发展其他的地震识别方法。本文通过对水合物层和游离气层地震数据进行小波变换发现可以利用水合物层和游离气层地震数据的尺度特征差异来识别水合物层和游离气层:

(1)在合适的尺度参数范围内,小波变换后的级数系数剖面上能识别水合物层的顶面、底面,这一点对于这两个界面在叠加剖面上不明显或无法辨别的时候显得更加重要;

(2)最佳尺度剖面上也能显示出水合物层的顶面和底面,同时还能显示出游离气层的底面,从而据此推断水合物层和游离气层的厚度;

(3)在最佳尺度剖面上,水合物层表现为高尺度特征,游离气层为低尺度特征;低尺度背景中的近似平行于海底的高尺度带是水合物带的特征。

感谢国家“863”计划的资助;本文中的实际地震数据由 Tinivella 先生提供,在此也表示衷心的感谢。

参考文献:

[1] 祝有海,饶竹,刘坚,等.南海西沙海槽 S14站位的地球化学异常特征及其意义 [J].现代地质,2005,19 (1): 39-44.

[2] 蒋少涌,杨涛,薛紫晨,等.南海北部海区海底沉积物中孔隙水的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度异常特征及其对天然气水合物的指示意义 [J].现代地质,2005,19 (1): 45-54.

[3] 杨涛,蒋少涌,杨竞红,等.孔隙水中 NH_4^+ 和 HPO_4^{2-} 浓度异常:一种潜在的天然气水合物地球化学勘查新指标 [J].现代地质,2005,19 (1): 55-60.

[4] 牛滨华,孙春岩,苏新,等.勘查地球化学方法适用于勘查天然气水合物的依据 [J].现代地质,2005,19 (1): 61-66.

[5] 刘海生,王南萍,侯胜利,等.海洋沉积物热释光——潜在的天然气水合物找矿方法 [J].物探与化探,2002,26 (4): 264-267.

[6] 王宏斌,梁劲,龚跃华,等.基于天然气水合物地震数据计

算南海北部陆坡海底热流 [J].现代地质,2005,19 (1): 67-73.

[7] 卢振权,吴必豪,强祖基.利用卫星热红外遥感探测南海天然气水合物 [J].地质学报,2002,76 (1): 100-106.

[8] 卢振权,吴必豪,强祖基,等.中国近海海域卫星热红外亮温增温异常探讨 [J].现代地质,2005,19 (1): 74-82.

[9] Shipley T H, Houston M H, Buffer R T. Seismic reflection evidence from widespread occurrence of possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises [J]. AAPG Bulletin, 1979, 63 (12): 2204-2213.

[10] Holbrook W S, Hoskins H. Methane hydrate and free gas on the Blake Ridge from vertical seismic profile [J]. Science, 1996, 273: 1840-1843.

[11] 孙春岩,黄新武,章明昱,等.天然气水合物及其地球物理识别方法的研究进展 [J].现代地质,2003,17 (2): 195-201.

[12] 刘学伟,李敏锋,张聿文,等.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.

[13] 孙春岩,黄新武,牛滨华.天然气水合物似海底反射现象 AVO 正演模型研究 [J].现代地质,2003,17 (3): 337-344.

[14] Li Minfeng, Liu Xuewei. An AVO inversion method for identifying gas hydrate and free gas [M]. // SEG J. The 7th SEGJ International Symposium, Sendai, Japan: Society of Exploration Geophysicists of Japan, 2004: 72-77.

[15] 姚天任,孙洪.现代数字信号处理 [M].武汉:华中理工大学出版社,1999: 209-297.

[16] 韩其玉.地震信号时频域表示 [J].石油大学学报,1994,18 (4): 26-30.

[17] 刘维国,杨兆进,郭惠娟,等.小波变换及其在地震资料处理中的应用 [J].哈尔滨工业大学学报,1995,27 (1): 1-4.

[18] 段虞荣,郑继明,段绍光.小波分析在油田地球物理勘探中的应用 [J].重庆大学学报,1996,19 (6): 44-53.

[19] Lu Shaoming, Momen George A. Elastic impedance inversion of multichannel seismic data from unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas [J]. Geophysics, 2004, 69 (1): 164-179.

[20] ODP Leg 164 Shipboard Scientific Party. Methane gas hydrate drilled at Blake Ridge [J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1996, 77 (23): 219.

[21] Eker C, Dvorkin J, Nur A. Sediments with gas hydrates: Internal structure from seismic AVO [J]. Geophysics, 1998, 63 (5): 1659-1669.

[22] Hombach M J, Holbrook W S, Gorman A R, et al. Direct seismic detection of methane hydrate on the Blake Ridge [J]. Geophysics, 2003, 68 (1): 92-100.

[23] 何樵登,熊维纲.应用地球物理教程——地震勘探 [M].北京:地质出版社,1990.