

基于波阻抗反演的天然气水合物地震检测技术

沙志彬^{1,2}, 郑 涛², 杨木壮³, 王明君⁴, 梁金强², 苏丕波⁵, 陈晓宇⁶

(1. 中国地质大学 资源学院, 湖北 武汉 430074; 2. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760; 3. 广州大学 地理科学学院 广东 广州 510006; 4. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 5. 厦门大学 海洋与环境学院 近海海洋环境 国家重点实验室, 福建 厦门 361005; 6. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 天然气水合物作为特殊的地质体, 可以有效地粘结碎屑颗粒, 降低沉积物孔隙度, 它的存在改变了地层沉积物的物理性质, 造成天然气水合物与围岩速度反差较大, 从而与围岩之间存在明显的波阻抗差。为了对地层中是否有天然气水合物赋存进行地震检测, 对南海北部神狐海域的天然气水合物赋存区域的地震资料进行波阻抗反演分析, 结果显示波阻抗反演方法能够作为探测天然气水合物的一种技术手段, 研究区天然气水合物矿体的波阻抗呈高值分布特征, 波阻抗值约为 3 850~ 3 960 g/cm³·m/s。综合分析认为, 波阻抗反演方法能够用于天然气水合物的地震探测、储层分析和综合研究工作中, 反演结果可以为天然气水合物储量计算提供比较准确的矿体面积和厚度参数。

关键词: 天然气水合物; 波阻抗反演; 地震检测

中图分类号: P631.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-8527(2010)03-481-08

The Seismic Detecting Technique on Gas Hydrates Based on Wave Impedance Inversion

SHA Zhibin^{1,2}, ZHENG Tao², YANG Mu-zhuang³, WANG Ming-jun⁴,
LIANG Jin-qiang², SU Pibo⁵, CHEN Xiao-yu⁶

(1. Faculty of Resources China University of Geosciences Wuhan, Hubei 430074 China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou, Guangdong 510760 China; 3. School of Geographical Sciences Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006 China; 4. Institute of Mineral Resources Chinese Academy of Geological Sciences Beijing 100037, China; 5. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Oceanography and Environmental Science, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005 China; 6. School of Earth Sciences and Resources China University of Geosciences Beijing 100083, China)

Abstract As specific geologic body, gas hydrate can cement effectively clastic particles and reduce porosity of deposition, so its presence changes physical property of the sedimentary strata and results in the difference of seismic-wave velocity between gas hydrate and the surrounding rock, and there exists obviously wave impedance difference. In order to detect the presence of sediments with gas hydrate, seismic data of gas hydrate zone in the Shenhu area of the northern South China Sea were used in the wave impedance inversion through practice, testing and summary. Wave impedance inversion method is considered as a kind of good seismic detection technique for identification of gas hydrates, meanwhile, the wave impedance of gas hydrate zone shows high value in the study area, and the wave impedance value is about 3 850–3 960 g/cm³·m/s. All the results suggested that wave impedance inversion can be used for detection, reservoir analysis and comprehensive research of gas hydrates. The wave impedance inversion results can provide comparatively accurate area and thickness parameters of gas hydrate zone for reserves calculation.

Key words gas hydrate; wave impedance inversion; seismic detecting technique

收稿日期: 2010-03-10; 改回日期: 2010-05-07; 责任编辑: 潘令枝。
基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (2006AA09A202); 国土资源部公益性行业科研专项项目 (200811014); 国家重点基础研究发展计划项目 (2009CB219502); 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室资助项目 (MRE200911)。
作者简介: 沙志彬, 男, 高级工程师, 1972年出生, 石油与天然气地质专业, 主要从事天然气水合物的研究。
Email: shazb2008@163.com
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引 言

经过多年的勘探及研究，2007年我国在南海北部神狐海域成功钻获了天然气水合物实物样品，钻探结果显示在8口钻井中共有3个站位获得了天然气水合物样品，证实了南海北部蕴藏有丰富的天然气水合物资源。

天然气水合物作为特殊的地质体，可利用其地震响应特征来识别、检测，其基本原理是利用天然气水合物与围岩之间的物性差异：声波在天然气水合物中的传播速度比较高，大约为2 200 m/s；密度为0.9 g/cm³；水的声波速度为1 500 m/s；密度为1.0 g/cm³；游离气的声波速度为849 m/s；密度为0.3 g/cm³。3者的差别如此之大，造成围岩之间存在明显的波阻抗差，所以国内外许多科学家都利用波阻抗反演技术在天然气水合物识别方面进行了有益的尝试^[1]。实践表明，波阻抗属性对于天然气水合物存在的反映明显。因此，可以利用波阻抗属性信息对天然气水合物进行识别和对天然气水合物成矿带进行标定及追踪，同时结合地质、地震属性等其他资料对天然气水合物的空间分布特征及展布规律进行研究^[1-5]。

本文根据国内外探测天然气水合物所用的波阻抗反演技术，同时基于南海北部陆坡特殊的成矿地质条件，对南海北部神狐海域的天然气水合物地震资料进行波阻抗反演分析，以期反演结果能够用于天然气水合物的储层分析和综合研究工作，给天然气水合物储量计算提供比较准确的矿体面积和厚度参数^[6-10]。

1 反演方法及原理

地震反演技术就是充分利用测井、钻井和地质资料提供的丰富的构造、层位和岩性等信息，从常规的地震剖面推导出地下地层的波阻抗、密度、声波速度、孔隙度、渗透率、砂泥岩百分比和压力等信息；反演与正演相对。地震剖面的同相轴实质上代表的是反射系数，同相轴追踪的是反射系数而不是砂岩地层，只有转换成波阻抗，才能真实地反映砂层的变化^[11-12]。

1.1 反演的目的

钻井资料反演后可提供各种岩性剖面，目的就是已知井点信息与地震资料相结合，为地质人员提供更多的地下地质信息，建立储层、油藏的概念模型、静态模型、预测模型，提高油田采

收率^[12-14]。

1.2 反演方法选择

目前，国内外运用的波阻抗反演方法主要有两种，一种是稀疏脉冲反演，另一种是模型约束反演。稀疏脉冲反演能够直接从地震信息中提取反射信息，虽然受到地震资料带宽等限制，但反演过程中能够忠实于地震资料，该反演方法得到的结果比较符合实际地质情况。另外，该方法充分考虑了地质构造框架模型和三维空间的多井约束模型与反演来限制反演结果的多解性，又使反演结果与地震资料具有的振幅、频率、相位等特征都有较好的对应关系。反演结果唯一性好，不易出现假象，对测井资料的多少、均匀程度没有明确的要求^[2,4]。

由于钻探区已经有8口钻井的测井资料，基于天然气水合物的特殊性和南海北部陆坡特殊的成矿地质条件，因此，在处理中采取稀疏脉冲波阻抗反演方法进行反演。

1.3 稀疏脉冲波阻抗反演基本原理

地震反射系数是由一系列大的地震反射系数叠加在高斯分布的小反射系数的背景上构成，大的反射系数相当于不整合界面或主要的岩性界面。稀疏脉冲波阻抗反演的目的是为了要寻找一个使目标函数最小的脉冲数目，然后得到波阻抗数据^[2]。

1.4 反演关键技术及流程

结合研究区的地震资料特点及任务要求，采用稀疏脉冲反演方法，运用JASON反演软件，在加强质量控制的前提下，完成了全区的反演处理工作。

波阻抗反演的优劣取决于关键环节的质量控制和方法的应用及参数的正确选取。所谓关键环节是指低频地质模型的建立和相对波阻抗反演^[2,10]。前者需要做好地质模型的正确建立、层位的准确标定、子波的正确提取以及测井资料标准化；后者主要是在正确构造模型所建立条件下，准确提取子波以及正确选取反演参数(图1)。

2 地震-测井资料联合波阻抗反演

经过极性确定、层位标定以及子波提取等流程，为保证标定的可靠性，减少人为因素的干扰，在保证合成记录与井旁地震记录保持良好相关性的前提下，采用联井联合标定，合理调整合成记录，使得横向上测井曲线的分布变化符合地震道

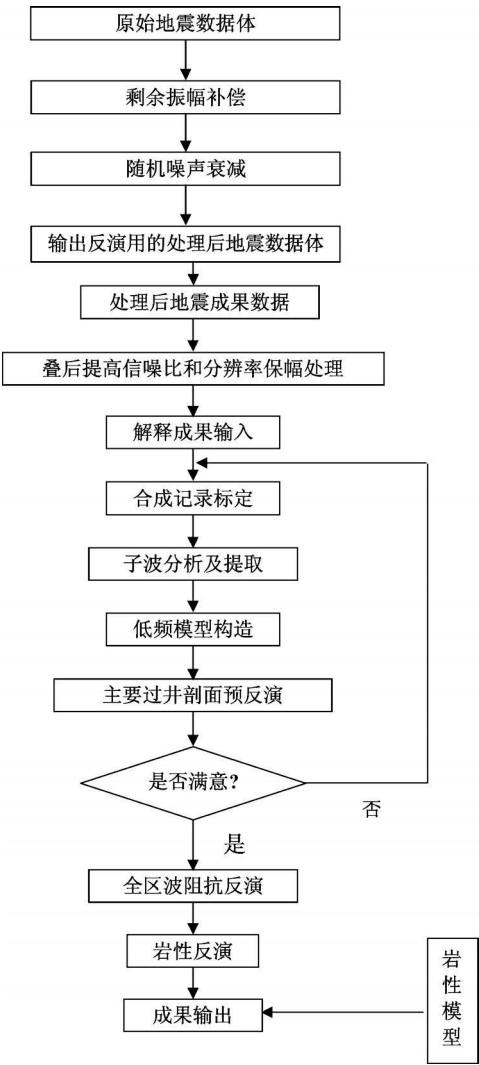


图 1 波阻抗反演流程

Fig 1 The flowchart of wave impedance inversion

的横向变化规律^[2 10](图 2)。从全井段合成记录相关的统计结果来看，合成记录与井旁地震道具有较好的对应关系。

2.1 地质模型建立

测井资料在纵向上详细解释了岩层的波阻抗细节，地震记录则连续记录了波阻抗的横向变化，两者的结合，为精确地建立空间波阻抗模型提供了必要的条件。建立初始波阻抗模型的过程，实际上就是把横向上连续变化的地震界面信息与高分辨率测井信息相结合的过程。其方法是首先将地震解释层位和断层内插，然后再根据构造框架模型中定义的地层接触关系，内插外推测井波阻抗数据，形成波阻抗数据体，为稀疏脉冲反演提供低频分量^[2 15]。

将 BSR 层位向下平移 200 m s，与 T₀ 层位构建模型框架(图 3)。在测井资料的内插外推过程中，

为了使内插外推结果更加合理，通过对 6 种 JA-SON 内插方法进行试验，最后选择了“反比加权法”。该方法插值效果较好，其优点是，产生的结果与井之间过渡自然，克服了其他插值方法局部化较严重的现象；因此，在测井资料插值建模过程中，采用这种方法建立了地质模型^[12 16]。

2.2 反演参数选择

针对研究区的资料情况和反演目的，对稀疏脉冲反演中的几个敏感性参数进行反复试验和选择，主要有 λ、采样率、趋势约束方式、子波影响、频带补偿、色标调试等^[12]。首先，选择联井剖面，对目的层 BSR 进行了大量、反复的试验，最后确定了适合目的层段的反演参数^[17]。

2.3 反演处理

经过大量的准备工作，得到了合理的时深关系曲线，运用校正过的测井数据及精细的解释层位，建立了三维地质模型及相对地质模型^[18- 19]，通过调整模型与相对波阻抗高、低频分量，使模型数据体与相对波阻抗数据体进行叠加^[20]，得到最终的绝对波阻抗体。

在参数选择的基础上，对采样率、趋势约束方式、子波影响、色标调试等也进行了反复试验和选择。在质量控制中，反演迭代的合成记录与实际地震剖面吻合较好，残差小。经过大量试验工作，最终选择了适合本研究区的合理反演参数。

2.4 反演效果分析

本文主要从以下 3 个方面对反演结果进行评价：(1)反演结果与已钻遇井的吻合情况；(2)反演结果的分辨率是否有明显的提高；(3)与未参与反演的井吻合情况。反演过程中由于加强了对反演过程的质量控制，波阻抗反演剖面很好地反映了目的层 BSR 的岩性变化特征，反演资料的分辨率较高^[21- 22]，与地震资料的吻合程度较好。将钻井成果和波阻抗数据进行交互分析后，认为研究区天然气水合物矿体的波阻抗值为 3 850~ 3 960 g/cm³·m/s 时，矿体与波阻抗值吻合最佳。

(1)反演结果产生的合成记录与原始地震记录剩余差值小。反演效果的优劣一般可直观地通过合成地震剖面与原始地震资料进行比较来确定，当合成地震剖面与原始地震资料的残差越小则反演效果越好，否则反演剖面的可信度就很低。从残差剖面(图 4)可以看出，残差非常小，充分说明反演结果的可信度是比较高的。

(2)反演数据体与井旁道曲线对应较好。反演

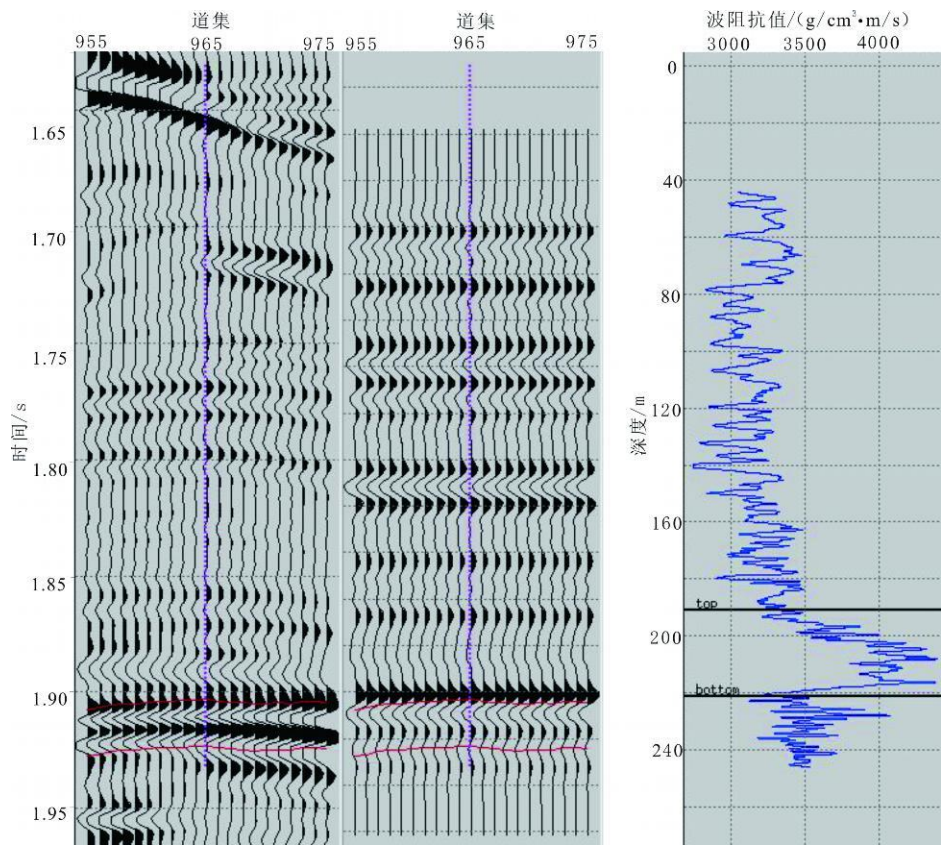


图 2 测井数据处理前后的合成记录对比

Fig. 2 Comparison of synthetic seismogram using processed and unprocessed well logging data

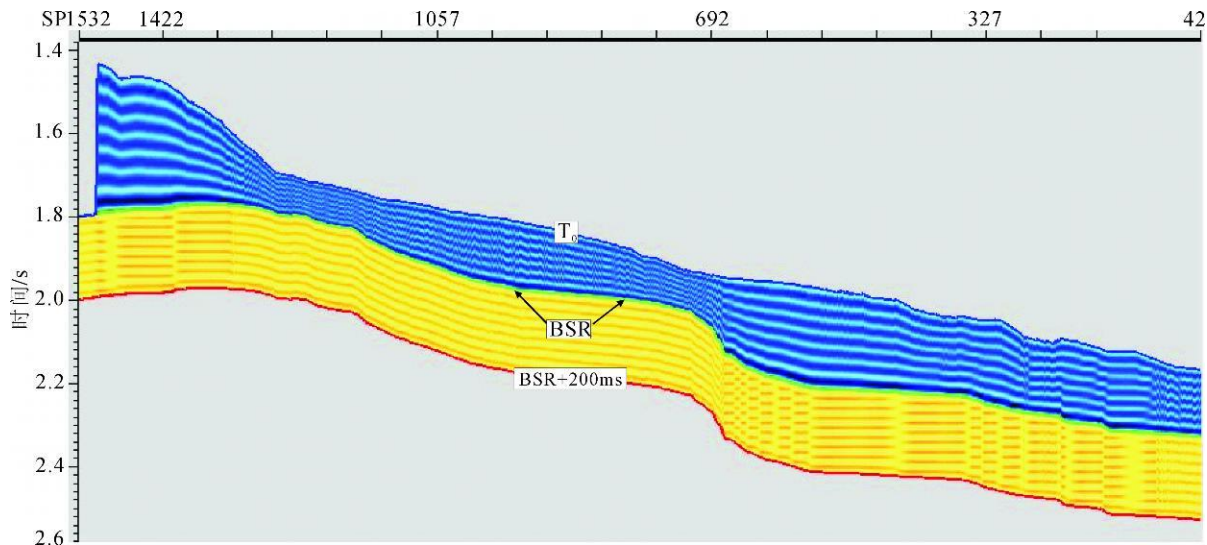


图 3 模型框架

Fig 3 Model of framework

数据体与自然电位测井曲线、声波测井曲线对应较好，矿体波阻抗值明显高于围岩波阻抗值，差异明显。从数据体的波阻抗切片来看，较好地反映了天然气水合物矿体的展布形态。而从过井反演剖面来看，测井解释的天然气水合物矿体在反

演数据体上亦清晰可见(图 5)。
(3)反演波阻抗体有效频带得到合理拓宽。通过反演剖面与地震剖面的叠合剖面可以看出，反演剖面分辨率明显高于常规地震剖面，可分辨 10 m 以上的矿体，矿体尖灭点清晰，断面断

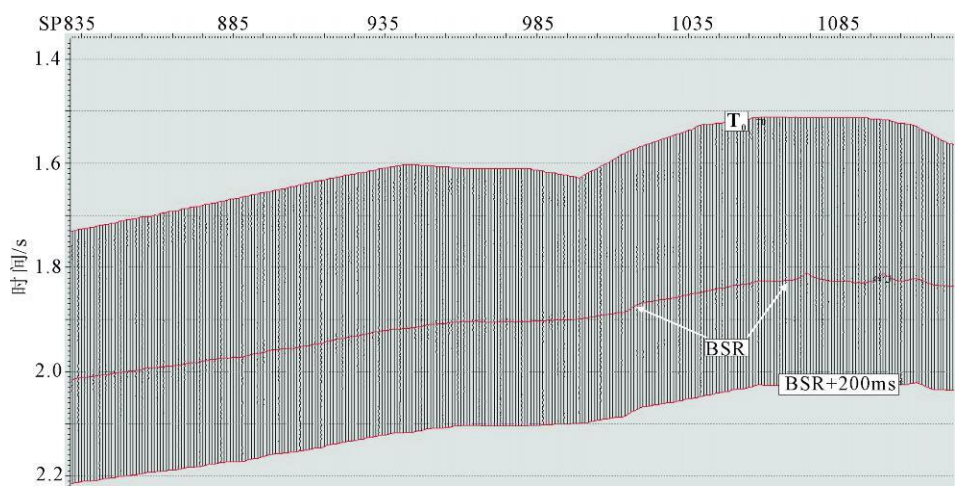


图 4 残差剖面图
Fig. 4 Profile of residual error

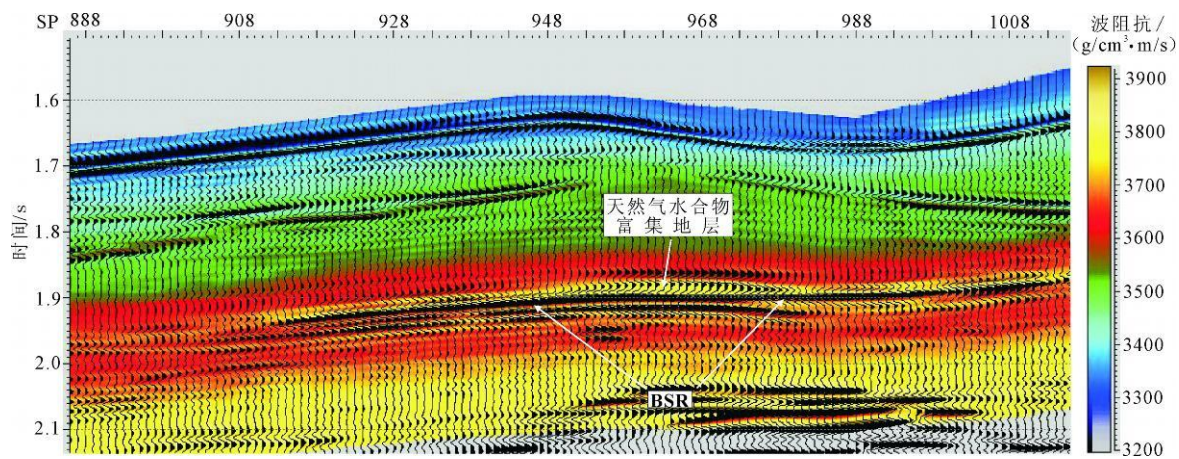


图 5 天然气水合物矿体在反演波阻抗数据体的显示
Fig. 5 The visualization of gas hydrates in wave impedance inversion data

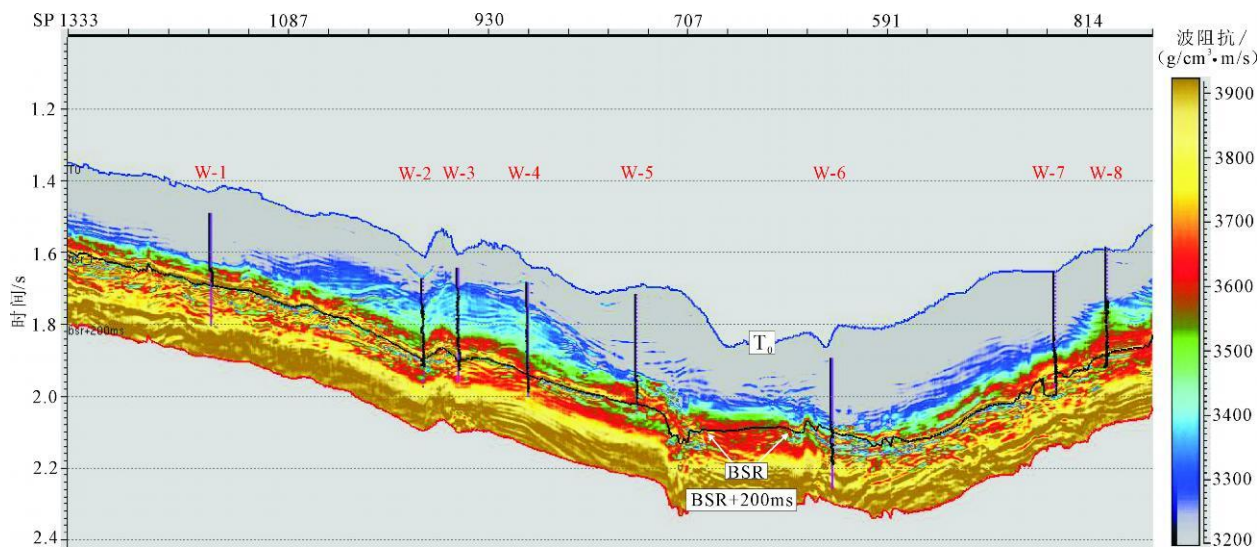


图 6 经过 8 个钻探井位的联井波阻抗反演剖面
Fig. 6 The inversion profile of wave impedance through 8 stations

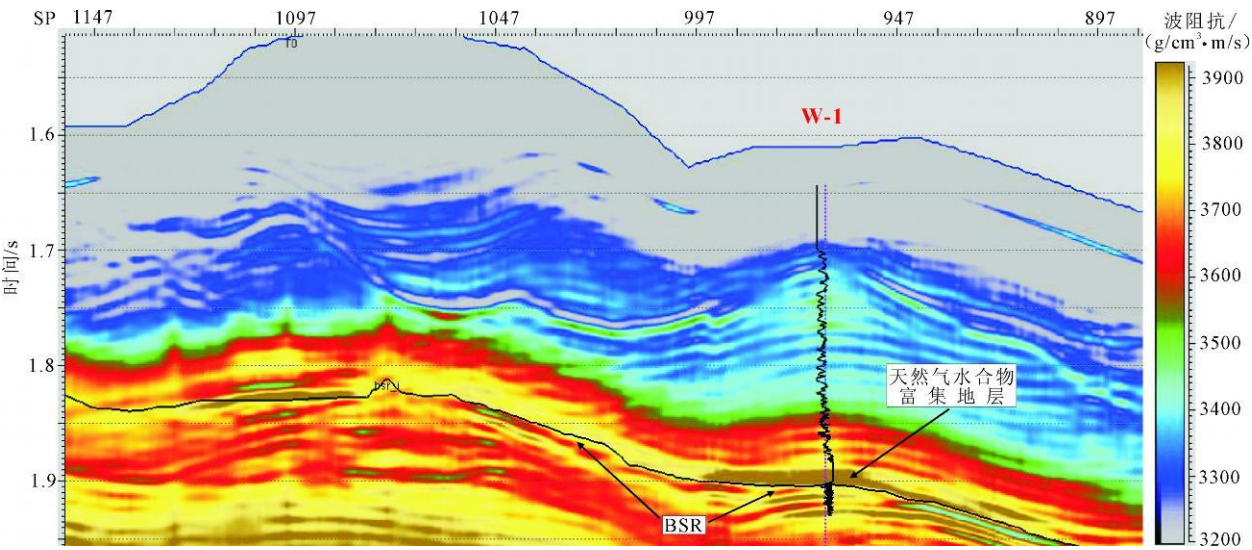


图 7 W - 1 站位波阻抗剖面
Fig. 7 Wave impedance profile of station W - 1

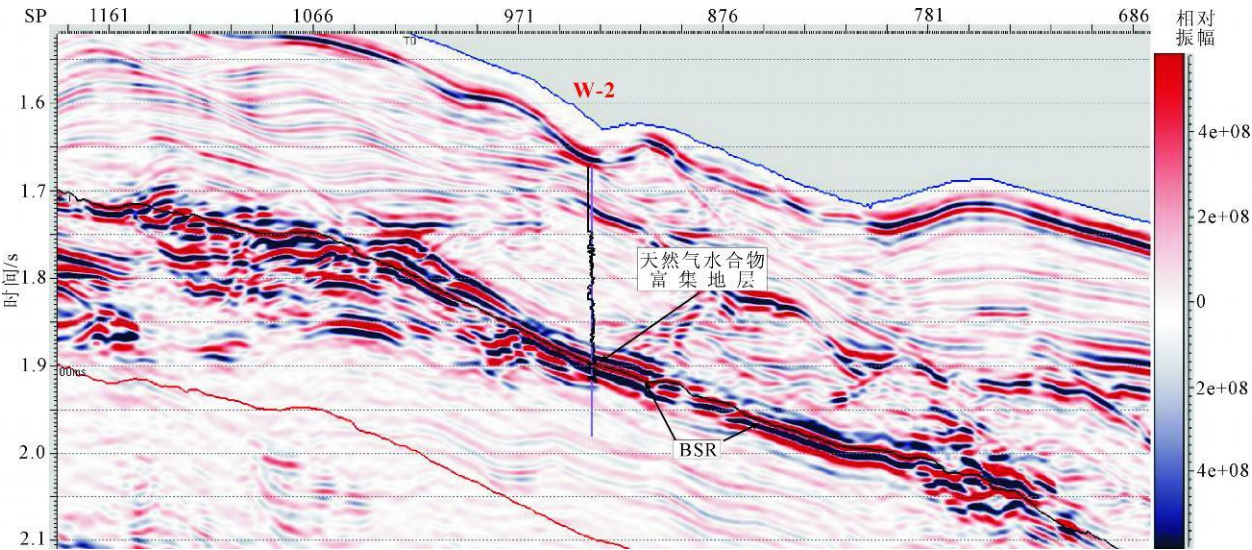


图 8 W - 2 站位地震剖面
Fig. 8 Seismic profile of station W - 2

点明显(图 6)。

(4)利用已钻遇矿体的井进行检验吻合度较高。将研究区测井解释矿体与井旁反演道进行对比,钻遇井矿体厚度大于 10 m 的符合较好。在波阻抗剖面上,弱波阻抗(相对低速)与强波阻抗(相对高速)的转换面为 BSR 的发育位置,而波阻抗值为 $3\,850\sim 3\,960\text{ g/cm}^3\cdot\text{m/s}$ (金铜色部分)的区域就是天然气水合物富集地层(图 7)。

(5)利用未参与反演的井进行检验吻合很好。反演完成后,对未参与反演的井进行合成记录标定,并将标定结果投影到反演剖面上,井曲线与反演剖面吻合很好,钻遇矿体反映明显,埋藏深

度和厚度误差很小(图 8)。

最后,还做了沿 BSR 向上平移 2 ms(上下 $\pm 5\text{ ms}$)波阻抗切片,如图 9 所示,图中清楚显示取得了天然气水合物样品的 W - 1、W - 2 和 W - 3 站位于高波阻抗值区域(波阻抗值为 $3\,850\sim 3\,960\text{ g/cm}^3\cdot\text{m/s}$),而没有取得天然气水合物样品的 W - 4 和 W - 5 站位于低波阻抗值区域(波阻抗值小于 $3\,850\text{ g/cm}^3\cdot\text{m/s}$)。所以,综合分析认为该反演数据体波阻抗高低分异明显,地质现象比较清楚,能较准确地反映地下地质情况,可用于储层分析和综合研究工作。

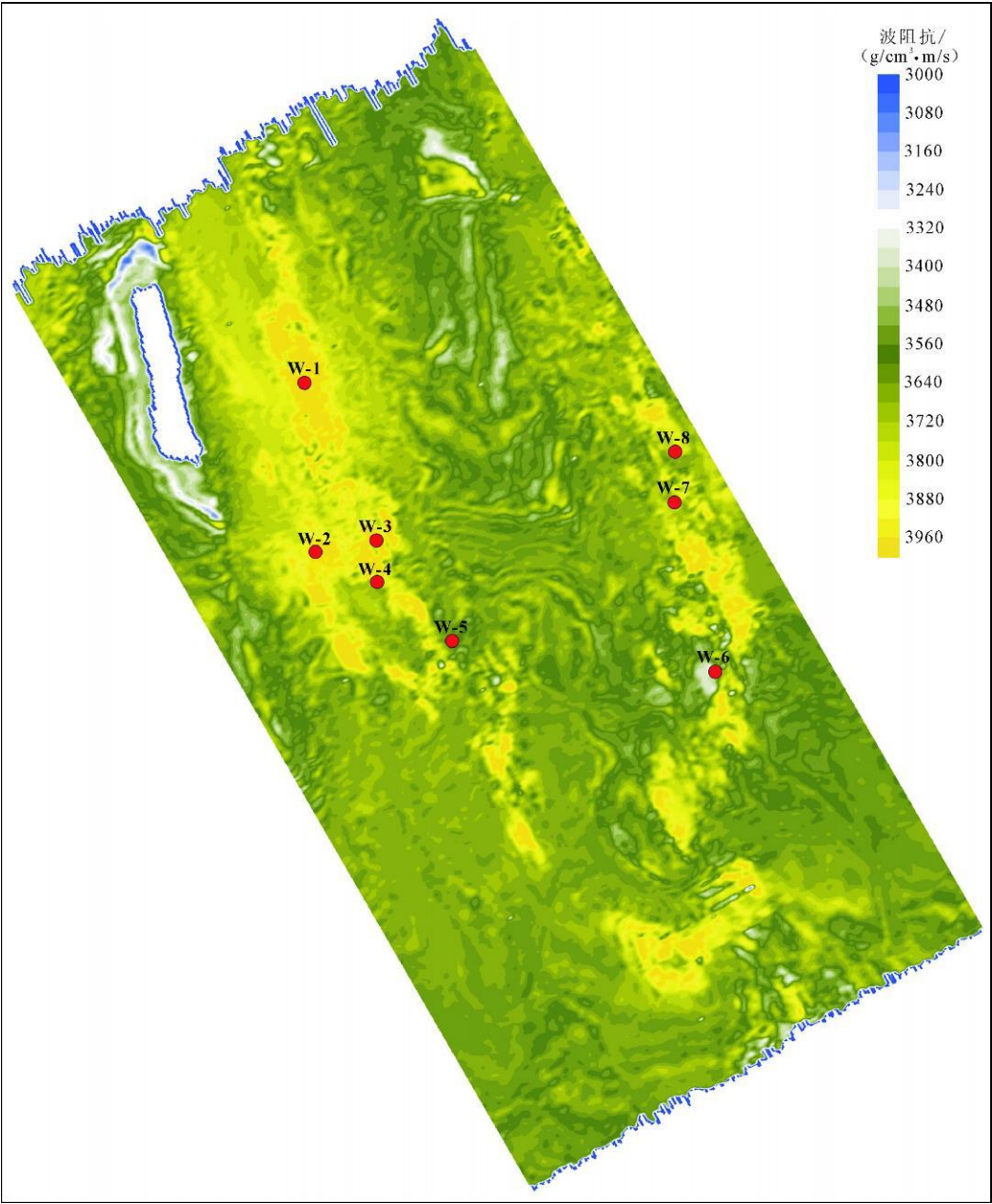


图 9 研究区沿 BSR 向上平移 2 ms (上下 ± 5 ms) 的波阻抗切片

Fig 9 The wave impedance slice (± 5 ms) upward movement (2 ms) along BSR of the interest region

3 结 论

通过对南海北部神狐海域的天然气水合物地震资料进行波阻抗反演分析，认为针对研究区所选的反演方法、反演流程合理，反演方法的应用及参数的选取正确，反演数据体波阻抗高低分异明显，地质现象比较清楚，能够比较准确地反映地下地质情况，可用于天然气水合物矿体的地震探测、储层分析和综合研究工作：(1)反演结果产生的合成记录与原始地震记录剩余差值小；(2)反演数据体与井旁道曲线对应较好；(3)反

演波阻抗体有效频带得到合理拓宽；(4)利用已钻遇矿体的井进行检验吻合度较高；(5)利用未参与反演的井进行检验吻合很好；(6)波阻抗反演能够作为天然气水合物矿体的地震检测技术手段，若结合研究区的天然气水合物成矿地质条件，反演结果完全可以用于天然气水合物的储层分析和综合研究工作，并为天然气水合物储量计算提供比较准确的矿体面积和厚度参数；(7)南海北部神狐海域天然气水合物矿体的波阻抗呈高值分布特征，地层中赋存矿体的波阻抗值约为 3 850~3 960 $\text{g}/\text{cm}^3 \cdot \text{m}/\text{s}$

参考文献:

[1] 金庆煊. 天然气水合物——未来的新能源 [J]. 中国工程科学, 2000(2): 29- 34.

[2] 李正文, 赵志超. 地震勘探资料解释 [M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1- 100.

[3] 张光学, 黄永样, 陈邦彦, 等. 海域天然气水合物地震学 [M]. 北京: 海洋出版社, 2003: 1- 254.

[4] 宋海斌, 张岭, 江为为, 等. 海洋天然气水合物的地球物理研究 (III): 似海底反射 [J]. 地球物理学进展, 2003 18(2): 182- 187.

[5] Miller J J, Myung W L, VonHuene R. An analysis of a reflection from the base of a gas hydrate zone of Peru [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1991, 75: 910- 924.

[6] 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.

[7] Hyndman R D, Spence G D. A seismic study of methane hydrate marine bottom simulating reflectors [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 6683- 6698.

[8] Ecker C, Dvorkin J, Nur A M. Estimating the amount of gas hydrate and free gas from marine seismic data [J]. Geophysics, 2000, 65: 565- 573.

[9] Lee M W. Seismic character of gas hydrates on the southeastern U. S. continental margin [J]. Marine Geophysical Researches, 1993, 16: 163- 184.

[10] 马在田, 耿建华, 董良国, 等. 海洋天然气水合物的地震识别方法研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(1): 1- 8.

[11] Shipley T H. Seismic evidence for widespread possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises [J]. AAPG Bulletin, 1979, 63: 2204- 2213.

[12] 孙春岩, 章明显, 牛滨华, 等. 天然气水合物地震空白带现象正演模型研究 [J]. 地学前缘, 2003, 9(1): 199- 204.

[13] Singh Satish C, Minshull Timothy A. Velocity structure of a gas hydrate reflector at Ocean Drilling Program Site 889 from a global seismic waveform inversion [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth and Planets, 1994, 99: 221- 233.

[14] Ewing J I, Hollister C H. Regional aspects of deep sea drilling in the western North Atlantic. Initial Reports of Deep Sea Drilling Project [M]. Washington: Government Printing Office, 1972: 951- 971.

[15] Tucholke B E, Bryan G M, Ewing J I. Gas hydrate horizons detected in seismic profile data from the western North Atlantic [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1977, 61: 698- 707.

[16] 张光学. 海底气体水合物 BSR 的 AVO 模拟 [J]. 海洋地质, 2001, 42(2): 54- 60.

[17] 王淑红, 宋海滨, 颜文, 等. 天然气水合物稳定带的计算方法与参数选择探讨 [J]. 现代地质, 2005, 19(1): 101- 107.

[18] Andreassen K, Hart P E, Grantz A. Seismic studies of a bottom simulating reflection related to gas hydrate beneath the continental margin of the Beaufort Sea [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth and Planets, 1995, 100: 659- 673.

[19] Katzman R, Holbrook W S, Paull C K. Combined vertical incidence and wide angle seismic study of a gas hydrate zone Blake Ridge [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth and Planets, 1994, 99: 975- 995.

[20] Schnurle K P, Liu C S, Hsuan T H, et al. Characteristics of gas hydrate and free gas offshore southwestern Taiwan from a combined MCS/OBS data analysis [J]. Marine Geophysical Research, 2004, 25: 157- 180.

[21] Tinivella U, Accaino F, Della Vedova B. Gas hydrates and active mud volcanism on the South Shetland continental margin Antarctic Peninsula [J]. GeoMarine Letters, 2008, 28: 97- 106.

[22] Zelt C A, Smith R B. Seismic travel time inversion for 2D crustal velocity structure [J]. Geophysical Journal International, 1992, 108: 16- 34.