

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020031901

# 南海神狐海域非均质性天然气水合物储层的分频反演

吴淑玉<sup>1,2,3,4</sup>, 徐华宁<sup>3,4</sup>, 刘俊<sup>3,4,5</sup>, 杨睿<sup>3,4</sup>, 宁伏龙<sup>1</sup>

1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074

2. 中国地质科学院, 北京 100037

3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 自然资源部天然气水合物实验室, 青岛 266071

4. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071

5. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 烟台 264001

**摘要:**南海北部陆坡神狐海域天然气水合物钻探结果显示,这一区域水合物储层具有纵横向分布不均质性、规模小且变化快的特点,使得精确评价水合物资源量面临诸多困难。根据井震数据分析了水合物分布特点,利用分频反演方法对该区水合物的空间分布进行预测。分频反演是利用测井和地震资料,采用支持向量机(SVM)的方法研究不同探测频率下的振幅响应(AVF),将AVF作为独立信息引入反演,建立起测井和地震波形间的非线性关系,充分利用地震中全频带信息,实现高分辨率的反演结果。采用该方法进行预测的结果与实际钻井情况非常吻合,验证这一技术适用于预测非均质性天然气水合物空间分布。基于预测结果并结合区域地质特征综合分析表明:水合物分布不均匀的主控因素除温压条件外,晚中新世之后的频繁构造运动使较深部的热解气沿着断层、气烟囱向上运移,形成厚块状“流体运移通道型”天然气水合物藏,而浅部沉积物中以扩散方式在渗透性良好的储层形成薄层状天然气水合物藏。

**关键词:**天然气水合物;空间分布;非均质性;分频反演;神狐海域

中图分类号:P738

文献标识码:A

## Frequency-divided inversion method of heterogenous natural gas hydrates reservoir in the Shenhua area, South China Sea

WU Shuyu<sup>1,2,3,4</sup>, XU Huaning<sup>3,4</sup>, LIU Jun<sup>3,4,5</sup>, YANG Rui<sup>3,4</sup>, NING Fulong<sup>1</sup>

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. The Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China

4. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

5. Yantai Coastal Zone Geological Survey Center, China Geological Survey, Yantai 264001, China

**Abstract:** Drilling results suggest that natural gas hydrates in the Shenhua area of the northern continental slope of South China Sea are obviously heterogenous in both vertical and horizontal directions, which brings about great difficulties to evaluate accurately the amount of hydrate resources. Based on integrated well-seismic data analysis for gas hydrates distribution characteristic, using frequency-divided inversion of SVM method in this research to predicted the hydrate spatial distribution in the area. Frequency –division inversion which is using logging and seismic data, application the method of support vector machine (SVM) under different frequency versus amplitude response (AVF), introduced the AVF as independent information, establish the nonlinear relationship between well logging and seismic waveform, make full use of the whole frequency band in the seismic, thus high resolution inversion results are obtained. The inversion results are in good agreement with the facts disclosed by drilling wells in this paper. Therefore, the method is believed feasible to the prediction of thickness heterogeneity. The research results also revealed that the mainly factors which control the thickness heterogeneity of gas hydrates include not only temperature-pressure conditions. Tectonic movement was frequent since late Miocene in the study area and deep pyrolysis gas shall be transported up along the vertical channels such as gas chimneys and faults, which is to form thick layer of “leakage type gas hydrate deposits fluid transported”, at

**资助项目:**国家重点研发计划“天然气水合物储层高精度刻画技术”(2017YFC0307406);国家海洋局海底重点实验室基金“台西南盆地沉积基底特征和莫霍面构造形态综合地球物理研究”(KLSG1603)

**作者简介:**吴淑玉(1985—),女,在读博士,副研究员,主要从事地震资料解释和反演工作, E-mail: hnwushuyu@163.com

**通讯作者:**徐华宁(1973—),男,博士,教授级高工,主要从事天然气水合物成像与反演等综合研究, E-mail: xuhuaning1973@163.com

**收稿日期:**2020-03-19; **改回日期:**2020-07-09. 蔡秋蓉编辑

the same time, the biogas generated by microorganisms will be accumulated in the thin layers of seabed sediments to form the “autochthonously generated and self-stored diffusion type” gas hydrates reservoir.

**Key words:** gas hydrates; spatial distribution; heterogeneity; frequency-divided inversion; Shenhua area

天然气水合物是由水和气体(最常见气体组分为甲烷)组成的复合物,通常稳定存在于低温、高压,水深大于300 m的近海和湖底沉积层中或永久冻土带内<sup>[1]</sup>。天然气水合物可能成为未来的洁净能源,与全球能源战略密切相关,同时也涉及地质灾害与海洋工程安全等现实应用问题以及全球气候、环境变化等重大科学问题<sup>[2]</sup>。近年来,针对天然气水合物的研究成为海洋领域的热点之一<sup>[3]</sup>。

针对海域天然气水合物的研究呈现明显的多学科交叉特征,主要内容涉及其形成和分解机制、碳循环过程、分布规律、勘探与开发等<sup>[4]</sup>。就勘探与分布预测而言,海域天然气水合物的分布区大多都是通过地震反射剖面上的似海底反射(BSR)特征来推断的,这也意味着地震勘探是当前天然气水合物识别的主要手段。基于BSR之上含水合物沉积物与BSR之下可能含游离气沉积物之间存在明显阻抗差异的特征<sup>[5]</sup>,形成一系列天然气水合物地震识别及其分布预测方法,包括地震属性分析<sup>[6-12]</sup>、地震速度分析<sup>[13-15]</sup>、无井约束稀疏脉冲反演<sup>[16-19]</sup>和井震联合稀疏脉冲反演<sup>[20]</sup>、走时反演(层析成像)<sup>[21]</sup>、全波形反演<sup>[4, 22-25]</sup>、叠前反演<sup>[26]</sup>和地震谱反演<sup>[14, 27-29]</sup>等。另外,根据AVO响应的特征差异,AVO正演分析在水合物的厚度和饱和度预测中也有成功应用<sup>[30-36]</sup>。由于水合物储层具有较强的非均质性、规模小且横向变化快的特点,利用常规的地震反演方法难以精确地刻画其水合物分布状态,且国际上对非均质性水合物储层预测技术的研究较少。如果含水合物沉积层下伏存在游离气,其响应频率会发生明显衰减,衰减程度主要受孔隙发育程度和气体含量等的影响,因而频率可作为水合物储层识别的一个重要属性,国内外学者已将时频分析应用到薄储层油气预测的研究,且取得了较好的效果<sup>[37]</sup>。

回顾时频分析的发展历程,Widess<sup>[38]</sup>首先提出用时频量化来描述薄储层的技术方法,主要建立在精细处理、正确的子波相位和真正的道间距振幅之间的关系上,后来,Morlet等<sup>[39]</sup>把时频分析技术应用到了石油勘探中,Partyka等<sup>[40]</sup>借助先进的计算机技术把时频分析技术转化为一种实用、便捷的地震解释工具,即地震谱分解技术(Spectral Decomposition),此后谱分解技术在储层描述中被广泛应用。Ren等<sup>[41]</sup>

根据Biot饱和流体孔隙介质地震波的传播理论,设计了不同岩性和物性参数模型在低、中、高频地震响应的变化规律与机理,并将AVF(不同时间厚度下振幅和频率的关系)引入时频分析中逐渐发展为分频反演,它的反演结果可以更加精细地刻画实际地层之间的接触关系,具有更高的分辨率、与井的吻合率较高的算法,是地震反演技术新的发展方向。

中国南海神狐海域的天然气水合物具有独特的成藏特征,其含水合物沉积层主要以厚、薄不一的互层形式存在且横向分布不均,通常以强复合反射BSR为其底界面标志,给水合物资源量精确评价带来困难<sup>[42-44]</sup>,尤其是与流体运移通道相关的厚块状水合物在地震剖面上很难直接识别并预测其厚度<sup>[29]</sup>。本文尝试利用相位转换和时频分析等手段提高地震纵向分辨率,采用基于向量机(SVM)的分频反演方法,将反演结果与区域地质特点结合,分析含天然气水合物沉积层的空间分布特点并探讨其形成模式。

## 1 地震分频原理

### 1.1 分频反演

分频反演方法是一种全新的全频约束反演方法,比常规反演具有更高的分辨率。该方法主要是依靠测井曲线数据和地震数据,通过研究不同地层厚度下的振幅与频率之间的响应关系(AVF),将AVF作为独立信息引入反演,合理利用地震的低频、中频和高频带信息,减少薄层反演的不确定性,得到一个高分辨率的反演结果<sup>[45-54]</sup>。

设地震记录  $s(t) \in L^2(R)$ ,  $L^2(R)$  表示能量有限函数空间,  $g(t)$  为基本小波,  $s(t)$  相对于  $g(t)$  的小波变换定义为:

$$S(b, a) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \overline{g\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (1)$$

式中,  $a$  为非零实数(称为尺度因子),  $b$  为实数(称为平移因子),  $\overline{g(t)}$  表示对  $g(t)$  取复共轭。

对(1)式进一步求得  $s(t)$  分频处理的结果  $S_i^*(b)$ , 其离散形式为:

$$S_i^*(b) = \omega^*(b) \sum_{j=1}^M \frac{Z_{j+1} - Z_j}{Z_{j+1} + Z_j} \delta(b - T_j) \quad (2)$$

式中,  $\omega^*(b)$  为小波分频的新子波,  $Z_j$  为阻抗,  $\delta(b - T_j)$  为狄拉克函数, 通过分解(2)式, 最终可以得到:

$$Z_{i,k} = Z_{i,k-1} + u(A_{k-1}^T A_{k-1} + \varepsilon I)^{-1} A_{k-1}^T (S_i^* - S_{k-1}) \quad (3)$$

式中,  $i$  为反演的区间范围  $(a_{i-1}, a_i)$ ,  $k$  为迭代次数,  $S_i^*$  为  $(a_{i-1}, a_i)$  区间范围内的地震数据,  $S_{k-1}$  为(2)式计算的地震记录,  $\varepsilon$  为正则化因子,  $u$  为控制迭代速度的加速收敛因子。

设计一个楔状模型(图 1a), 通过不同主频的子波与其反射系数进行褶积, 得到一系列的合成地震记录剖面, 从而得到振幅与厚度在不同频率时的调谐曲线(图 1b)。地震波形是阻抗(AI)和时间厚度(H)的函数, 反演时仅根据振幅同时求解 AI 和 H, 即已知一个参数求解两个未知数, 结果是多解的。AVF 揭示了一个重要规律: 同一地层在不同的主频子波下会展现不同的振幅特征, 而 AVF 关系非常复杂, 很难用一个显示函数表示, 因此通过支持向量机(SVM)非线性映射的方法, 在测井和地震子波分解剖面上找到这种对应关系, 利用 AVF 的响应关系进行反演。

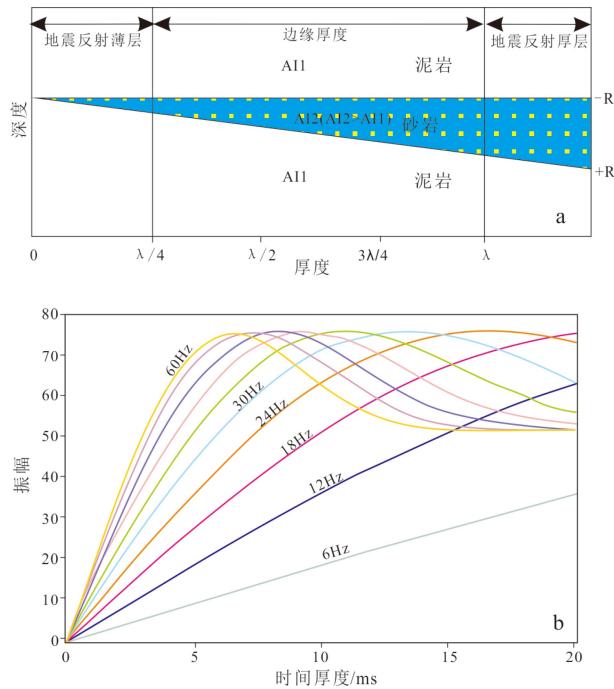


图 1 楔状模型的频率—厚度—振幅响应

a. 楔状模型, b. 不同地震频率下的厚度和振幅交汇图。

Fig.1 Frequency-thickness-amplitude response of wedge model  
a. wedge model, b. the relation between thickness and amplitude under different seismic frequencies.

## 1.2 支持向量机原理

SVM 由 Vapnik 于 1992 年首次提出, 它是一种类似神经网络的计算方法, 可以作为模式分类和非线性回归, 通过 3 个参数控制的学习方法, 克服了神经网络所存在的比如局部最优, 过度学习和网络不稳定等问题, 为统计学习和人工智能中非常先进的算法。其基本思想是对于一个给定的具有优先数量训练样本, 通过适当地选择函数子集及其该子集中的函数判别, 使得学习机器的实际风险达到最小, 得到最佳的推广化能力<sup>[53]</sup>。

假设  $N$  个两类  $\geqslant$  线性可分样本的特征为  $x_n \in R^d$  ( $d$  为特征维数), 其类别标签为:

$$y_n \in \{+1, -1\}, n = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

将样本线性分离的超平面可以改成:

$$y_n = \begin{cases} +1 & x_n^T w + b \geqslant +1 \\ -1 & x_n^T w + b \leqslant -1 \end{cases} \quad (5)$$

以上两个式子合并为:

$$y_n(x_n^T w + b) - 1 \geqslant 0 \quad (6)$$

其中:  $x_n^T w + b = 0$

分类间距为:  $2/\|w\|$ , 为了使得间隔最大, 实际上是使:

$$\Phi(w) = \frac{1}{2} \|w\|^2 = \frac{1}{2} w^T w = \frac{1}{2} (w^0 w) \quad (7)$$

求解最优分类面就是求取(7)式在(6)式约束条件下的极值, 而超过平面  $H_1$  和  $H_2$  的样本点就是极值点, 此时支持了超平面, 称之为支持向量。在特征空间 F 内, 为了满足在(6)式条件下求的极小值:

$$\min J(w, \xi) = \frac{1}{2} w^0 w + \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (8)$$

利用 Lagrange 优化方法可求解上述问题, 将支持向量机的优化问题转化为求解二次归化问题:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max W(a) = \sum_{i=1}^n a_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j y_i y_j K(x_i x_j) \\ s \cdot \sum_{i=1}^n a_i y_i = 0 \quad 0 \leqslant a_i \leqslant c, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \quad (9)$$

式中,  $K(x_i x_j)$  为任何一个满足 Mercer 条件的核函数, 较常用的核函数有线性核:

$$K(x, z) = x^T z \quad (10)$$

多项式核:

$$K(x, z) = (x^T z + 1)^d \quad (11)$$

高斯核:

$$K(x, z) = \exp\left[-\frac{\|x-z\|^2}{2\sigma^2}\right] \quad (12)$$

### 1.3 分频反演步骤

- (1) 对地震数据进行频谱分析, 获得目标层段地震频带范围和噪声分布;
- (2) 在水合物有效目标层位内选择有对水合物敏感的弹性参数曲线, 将有代表的测井曲线和地质参数作为样本;
- (3) 对地震数据进行中值滤波, 去掉地震异常、平滑地震记录, 有效地保护边缘信号以及对尖锐噪声进行有效平滑的特点;
- (4) 根据对地震数据的频宽、低—中—高频和主频特点, 设计分频间隔点, 采用小波分频原理对地震数据进行分频, 并对分频数据进行地震属性提取, 从而产生不同频段的地震属性数据;
- (5) 建立目标测井曲线和分频地震属性的非线性映射关系(AVF), 利用支持向量机(SVM)方法建立分频属性和目标曲线之间的非线性关系, 通过训练学习, 直到反演结果与实际井曲线特征相对应。

## 2 区域地质背景

神狐海域位于珠江口盆地的白云凹陷内部(图 2), 处于欧亚、太平洋和印度—澳大利亚三大板块交汇

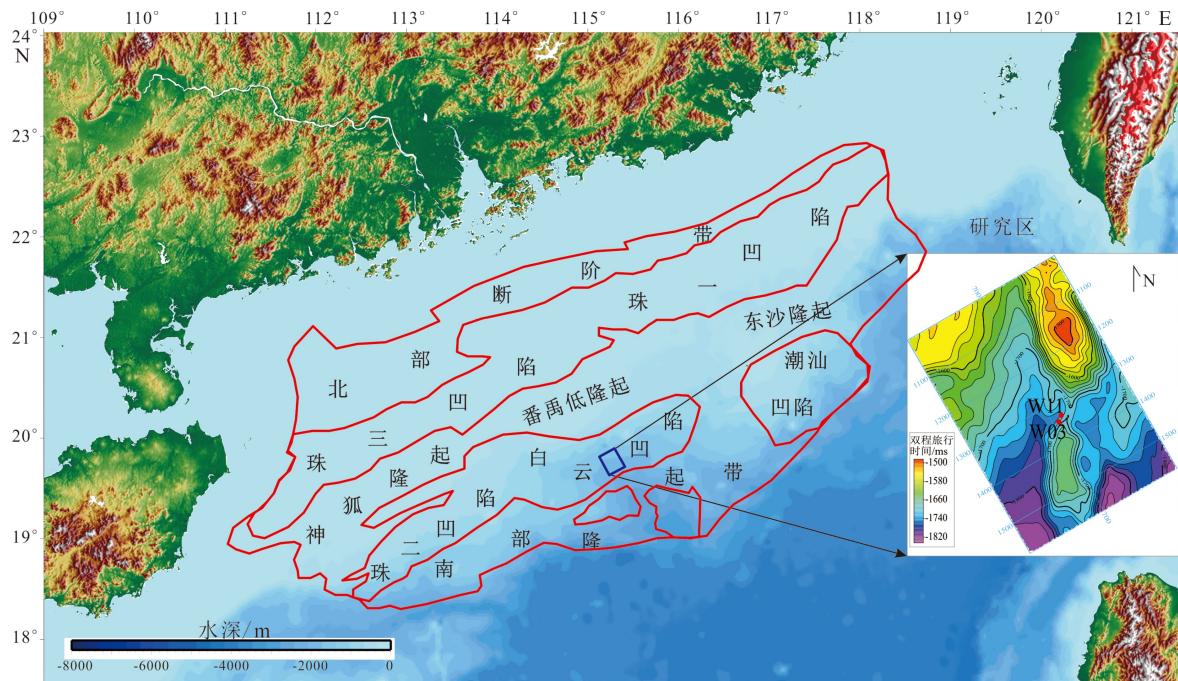


图 2 南海北部大陆边缘珠江口盆地区域构造与研究区位置图<sup>[61]</sup>  
Fig.2 Tectonic map showing regional structures and study area of the Pearl River Basin on the northern continental margin of the South China Sea<sup>[61]</sup>

处附近的华南大陆南缘, 其形成和发展与南海盆地的构造运动密切相关, 历经了神狐、珠琼、南海和东沙运动等 5 次大的构造运动<sup>[55-56]</sup>。自渐新世晚期以来, 南海北部的陆坡处于拗陷期, 沉积环境为滨海—半深海, 物源供给充足, 沉积速率大且地层厚、岩石粒度为中—上等偏细。中新世晚期以后, 该区以三角洲和扇三角洲沉积为主, 滑塌扇、浊积扇和重力流非常发育。到第四纪时期, 发育滑塌扇, 以上沉积体具有较快的沉积速率, 沉积厚度大, 有机质比较丰富, 上覆块体快速堆积使得有机质能够得到有效保存。由于多次地壳运动和多阶构造演化, 发育了 NE、NW 和 NNE 向正断层, 断裂的发育和新构造运动还诱发了深部超压泥质岩类的塑性流动, 形成泥底辟活动带, 泥底辟与其上覆较陡的断裂以及垂向裂隙系统共同构成了流体的渗漏通道, 为天然气向上运移到浅部水合物稳定带迁移创造了有利条件<sup>[57-60]</sup>。

## 3 含天然气水合物沉积层地球物理响应特征

### 3.1 BSR 地震反射特征

水合物稳定带受温压条件限制, 其底界面通常以强振幅的 BSR 为特征。在研究海域, BSR 位于海

底之下 135~230 mbsf, 其强振幅反射特征明显, 波形极性与海底相反并与正常沉积地层斜交, 横向延伸长度为 1.7~5.36 km<sup>[42]</sup> (图 3)。在钻获天然气水合物位置处, BSR 由一系列强反射界面联合组成, 这是由于沉积物孔隙和渗透等差异导致天然气水合物饱和度不同, 在垂向上形成物性差异所致。BSR 上方振幅空白带显示明显, 下部的杂乱或模糊反射与游离气的存在有关。

### 3.2 测井响应分析

2015 年, 广州海洋地质调查局在研究区 W03 站位(水深 1 295.41 m)进行随钻测井和取样。结果表明, 此处含天然气水合物沉积层厚度近 80 m, 是迄今在南海所有发现含水合物沉积中最厚的。图 4 是 W03 井位置的电阻率、纵波速度、密度与自然伽马测井曲线。根据电阻率和纵波速度曲线, 海底之下沉积层具有典型的“三段区间”变化特征。第 1 段区间为 1 295.41~1 424.14 m, 沉积层电阻率基本保持不变, 约 1.57 Ω·m, 表明沉积物物性稳定, 而纵波速度曲线呈线性缓慢增长趋势, 说明与沉积压实作用有关。密度与自然伽马曲线都表现为小幅度振荡, 密度为 1.76~1.89 g/cm<sup>3</sup>, 自然伽马的平均值大约为 65 API。密度与自然伽马测井曲线的振荡特征可能与沉积层中粉砂质/泥的比值变化以及

孔隙水含量的变化有关。第 2 段区间为 1 424.14~1 504.24 m, 从 1 424.14 m 的深度段往下, 电阻率以 1.57 Ω·m 和纵波速度以 1 770 m/s 开始迅速增大, 其最大值分别达到 8 Ω·m 和 2 315 m/s, 1 424~1 504 m 深度段(厚度约 80 m)的高电阻率、高声波速度异常指示着天然气水合物的存在。取样分析结果表明, 这一深度区间内水合物层厚最薄为 4 m, 最厚为 34 m, 平均含水合物饱和度为 24.4%, 平均渗透率为 2.58 mD, 渗透性较差。另外, 这一深度区间的密度测井曲线没有明显减小, 说明水合物不是以大块状或厚层状存在, 而是以弥散状分布于沉积层中。自然伽马曲线在这一深度区间表现出升高—降低—再升高的变化特征。通常天然气水合物赋存区段的孔隙度相对较高, 也就是砂/泥比会上升, 对应的自然伽马会相对下降, 而此处自然伽马值整体较高的原因是放射性较高的有孔虫化石, 为天然气水合物的生长和聚集提供了空间。

### 3.3 非均质性储层特征

南海北部陆坡神狐海域水合物储层是以厚薄相间的水合物存在, 相关学者<sup>[42]</sup>在 2015 年水合物钻探的 19 口井中, 通过常规测井和随钻成像测井 (GVR) 发现, 厚层水合物以厚层状和分散状分布, 薄层水合物以斑块状和薄层状分布。厚层状水合

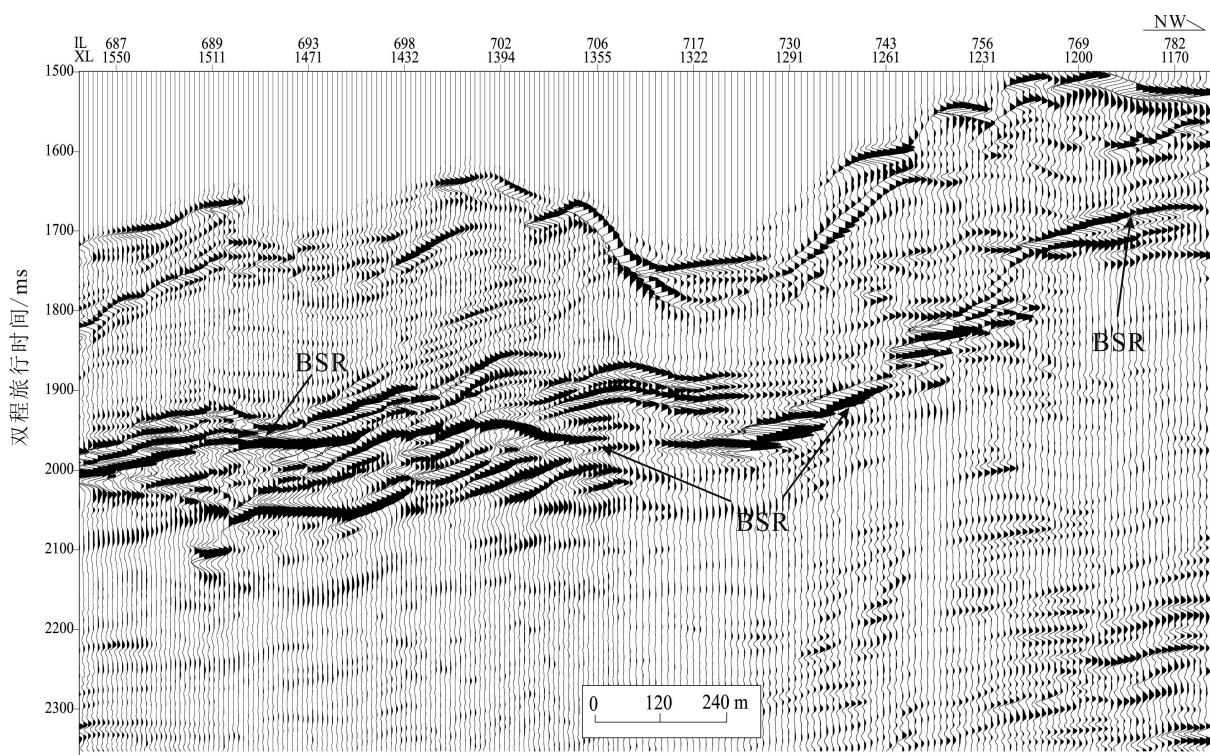


图 3 BSR 在地震剖面上的反射特征  
Fig.3 Seismic profile of BSR reflection characteristics

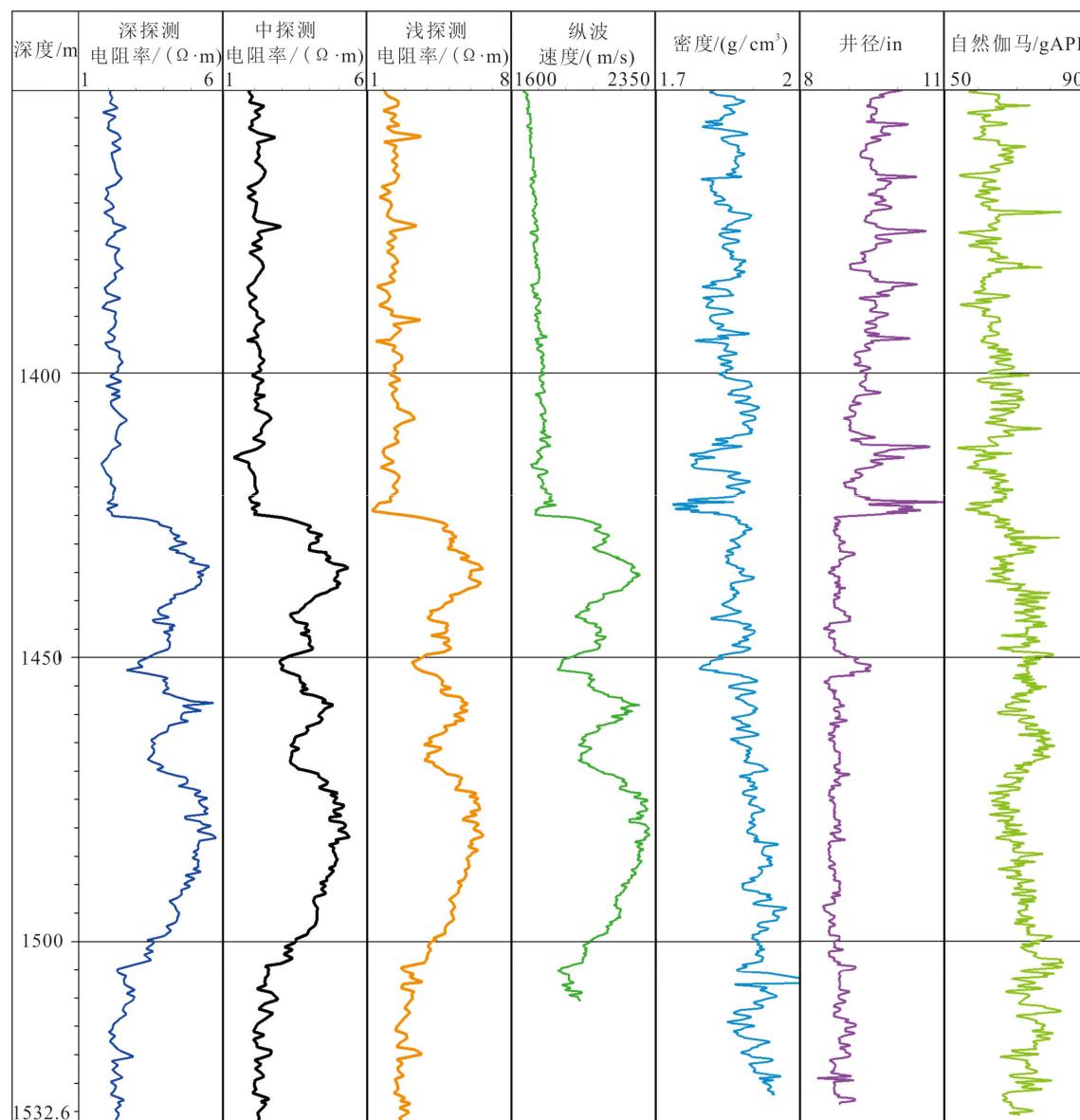


图 4 含水合物沉积层 W03 井的测井曲线  
Fig.4 Logging curves for gas hydrate deposits in the Well W03

物发现存在于 W02、W07、W11 和 W16 井, 其中厚层状水合物埋藏较深, 主要分布在 100~200 mbsf, 且厚度较大, 单层厚度可达 10 m, 主要分布在厚层水合物层的顶部, 电阻率频谱较窄, 为明显单峰, 主要为高饱和水合物。另一种厚层水合物以分散状分布, 主要发现在 W01、W02、W07、W11、W17 和 W19 井中, GVR 图像为分散状浸染分布于基质中, 厚度也较大, 单层厚度可达 5 m 以上, 主要分布在厚层状水合物之下、厚层水合物层的中部, 电阻率为频谱较宽的单峰, 水合物为中饱和度。薄层状水合物以斑块状分布于基质中, 主要发现在 W02 和 W19 井中, 斑块状水合物非均质性强, 大的斑块状水合物可达 0.4 m, 小的斑块状水合物只有 0.1 m, 其

分布规律不明显, 主要分布于分散状水合物的下面、且厚层水合物层的底部, 具有较强的非均质性, 为高饱和—中饱和水合物。薄层状水合物在每口井中存在, 通过测井曲线(中子、密度和声波速度)都无法识别, 只有 GVR 图像上显示高亮和电阻率呈增大特征<sup>[42]</sup>。

厚薄相间水合物的存在形式, 使得水合物地层的物理性质改变, 具有各向非均质性, 大大增加了天然气水合物储层识别的困难, 本文主要采用分频反演方法解决以上问题。主要以厚薄的楔状模型为例, 分别采用约束稀疏脉冲反演方法和分频反演方法, 通过对比论证分频反演方法在厚薄相间天然气水合物储层中的适用性。

## 4 非均质性天然气水合物识别技术

### 4.1 基于正演模型的反演方法对比

目前天然气水合物储层预测主要通过约束稀疏脉冲反演方法, 理论技术上可以有效预测厚度范围在  $\lambda/4 \sim 2\lambda/3$ , 去掉模型精度对反演结果的影响, 该技术实际也只能应用于  $\lambda/4 \sim \lambda/2$  之间的厚度, 如果想要识别更厚或更薄的物体, 仍需要测井信息的加入, 这就降低了其预测性<sup>[63]</sup>。为了验证分频反演对厚薄储层识别的有效性, 通过设计的 widess 楔形模型(图 5a), 选用主频为 30 Hz 的子波进行正演模拟(图 5b), 分别采用稀疏脉冲反演和分频反演方法, 可以看出稀疏脉冲反演的识别范围为  $\lambda/4 \sim 2\lambda/3$ (图 5c), 该方法主要是利用地震资料主频信息, 但如果要识别物体的厚度范围, 需要加入准确的初始低频模型, 而天然气水合物勘探中钻井数量少,

要得到精确的初始低频模型十分困难。分频反演的预测结果能识别出厚度范围为  $\lambda/8 \sim \lambda$  的储层(图 5d), 尤其适合对超过常规分辨率的厚层水合物进行刻画, 相对稀疏脉冲反演方法具有明显优势<sup>[46, 64]</sup>, 预测的厚度更加接近于设计的楔形模型, 该方法更适合用于天然气水合物厚度变化范围较大的储层预测。

### 4.2 目标曲线确定

将水合物层段和非水合物层段的声波阻抗和电阻率进行交汇(图 6), 红色部分为含水合物样品, 绿色为非水合物样品, 水合物沉积层与非水合物沉积层还存在重叠的声波阻抗区间, 假如直接利用井中阻抗曲线作为目标属性进行相关反演, 很难取得较好的效果。由图可以看出根据声波阻抗的门槛值(橘红色)区分的水合物和非水合物区域效果不如深电阻率(蓝色, 门槛值为  $2.6 \Omega \cdot m$ )的效果好, 且电阻率比速度曲线更能刻画水合物的顶底及其物

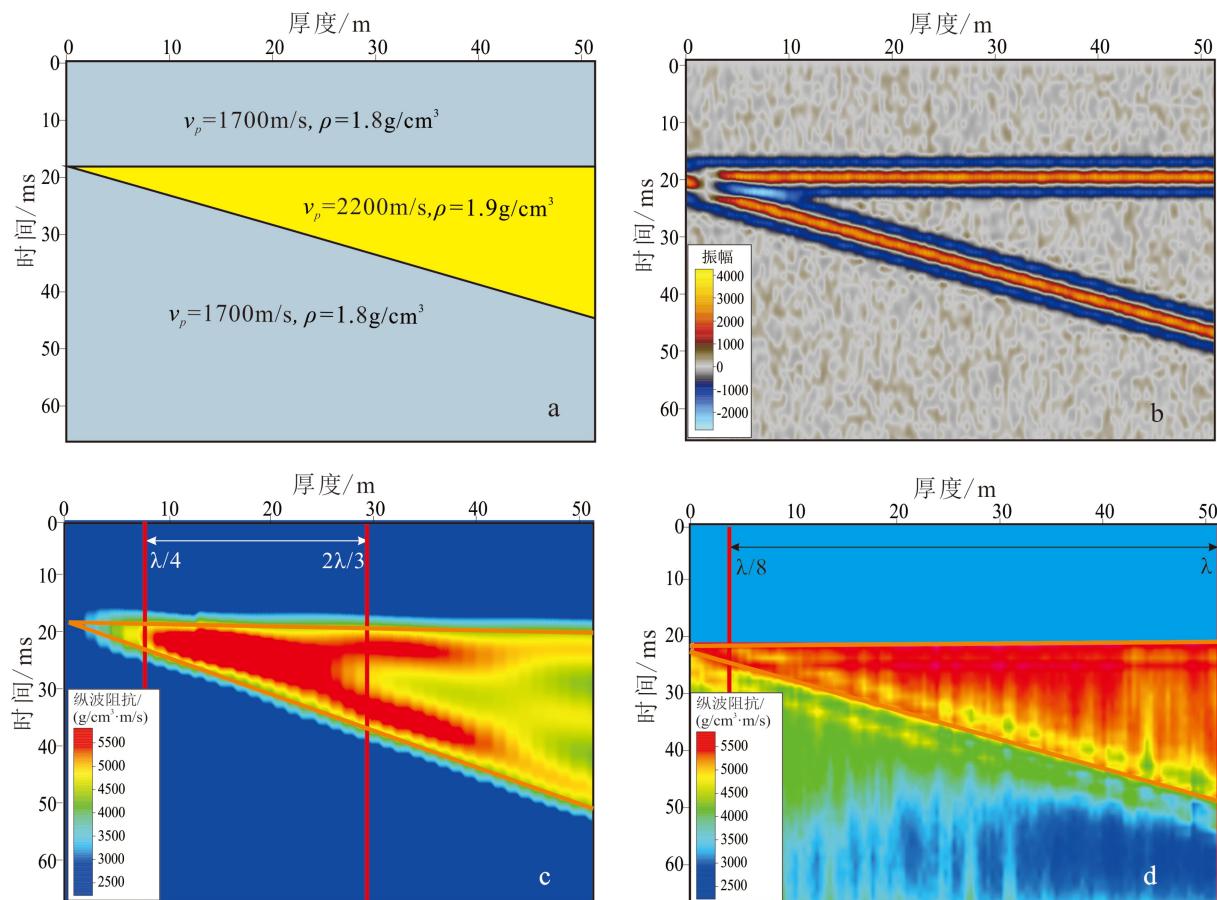


图 5 楔状模型正演下不同反演方法储层厚度识别对比

a. Widess 楔状模型, b. 30 Hz 地震正演模拟, c. 稀疏脉冲反演结果, d. 谱反演结果。

Fig.5 Identification and comparison of reservoir thickness by different inversion methods under Widess wedge model

a. Widess wedge model, b. 30 Hz seismic forward simulation, c. sparse pulse inversion results, d. frequency-divided inversion results.

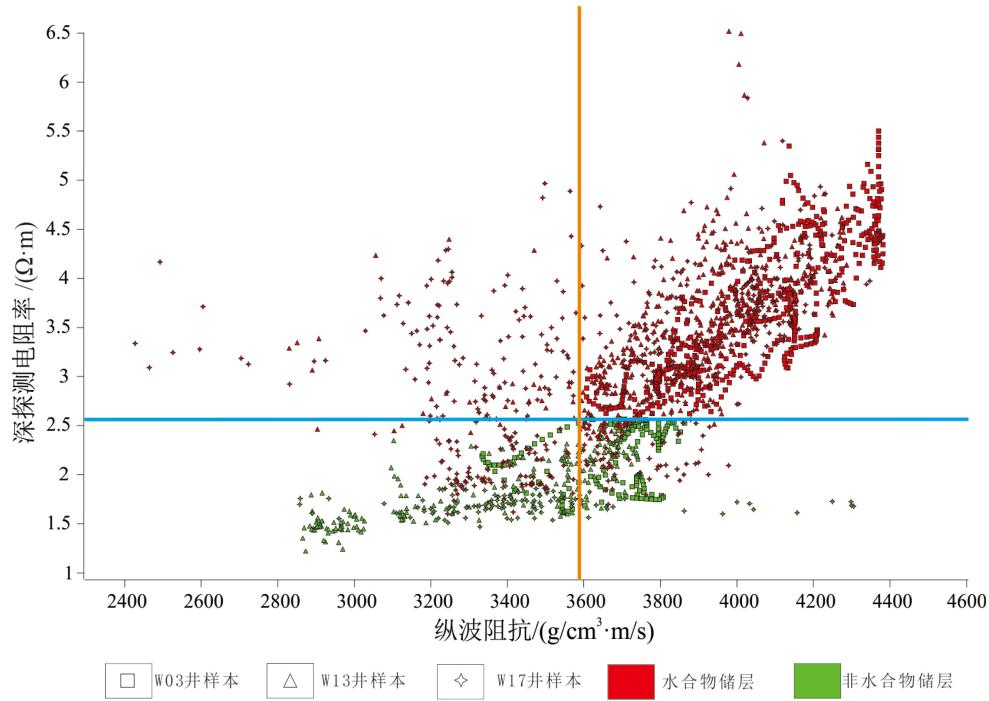


图 6 声波阻抗和电阻率的交会图  
Fig.6 Crossplot of acoustic impedance versus resistivity

性特征, 因此在反演过程中, 通过以电阻率曲线作为学习目标, 充分利用地震资料中有效频带中的相对高频和相对低频信息, 又保持了总体趋势, 利用电阻率曲线的分频反演能够更加有效地刻画水合物的具体形态和范围。

#### 4.3 地震分频频段

将水合物层段的地震进行频谱扫描, 其频率主要分布在 6~160 Hz, 主频为 60 Hz(图 7), 具有明显的富低频和宽频的特征, 为充分利用各个频率段的信息, 按照频宽范围, 将频带设置为 6、15、30、45、

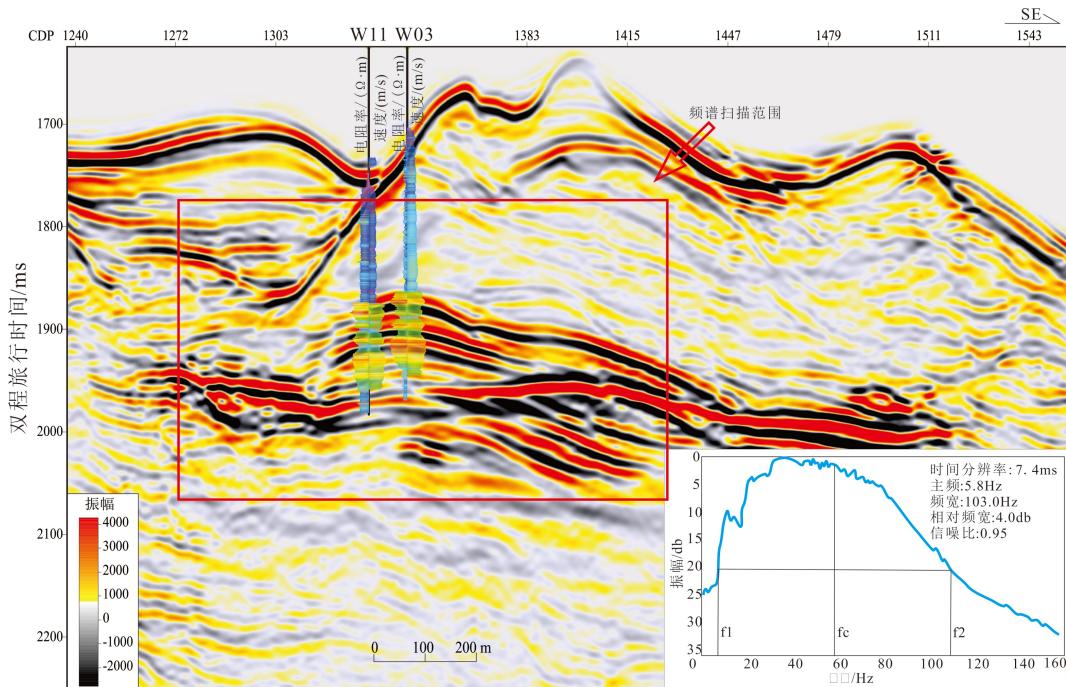


图 7 水合物地震剖面的频谱特征  
Fig.7 Spectral characteristics of gas hydrate seismic profile

60、90、120、150 Hz 等几个频段分隔点。

#### 4.4 支持向量机的分频反演

通过对地震数据进行频谱分解, 将分解的频谱能量体对各频段数据体计算振幅、频率和相位等地震属性。利用电阻率曲线和低频模型, 对分频的属性数据利用 SVM 方法进行训练, 计算不同厚度下 AVF 的关系, 将 AVF 关系引入分频反演, 建立电阻率曲线与地震波形之间的非线性映射关系(图 8)。最终将每个分频属性体作为输入, 利用训练好的分频体和反演体之间的 AVF 关系, 合成最终的反演体<sup>[48, 50, 53, 65]</sup>。

### 5 反演结果及分析

#### 5.1 分频反演结果可靠性评价

地震主频 60 Hz 的地震数据, 其纵向分辨率为 8 m, 对于小于 8 m 的薄层其地震分辨率比较难以识别。下面通过对比原始地震剖面与过井的深电阻率曲线(图 9a), 发现在测井曲线异常段地震存在较强的阻抗界面, 由图从上往下可以看出, 图中红色箭头所指显示第一个强反射地震反射轴与深电阻率对应的结果很好, 第二个地震反射轴为双峰的强反射, 而测井上电阻率显示含水合物层较薄, 第三个地震反射轴为频率较高的薄层反射特征, 而深电阻率曲线显示的含水合物层较厚。通过对原始地

震进行 90°相位转换, 重新进行井震标定(图 9b), 从上往下可以看出, 第一个强反射轴与深电阻率曲线与之前一样, 比较吻合; 第二强反射轴由双峰变成单峰, 强轴对应水合物的顶界, 但是无法区分该套水合物的厚度; 第三个强反射轴地震频率形态振幅还是不变, 与深电阻率曲线还是不能够吻合。通过以上技术手段发现, 对于薄层的地震反射特点利用 90°相位转换可以只能显示水合物的顶界, 但是不能区分薄层的厚度; 对于厚层的含水合物层, 利用 90°相位转换方法既不能区分水合物的顶底界面, 也不能区分厚度。

本文利用分频反演方法对南海神狐海域天然气水合物进行反演(图 10), 可以看出, 反演结果与已钻遇井相当吻合, 通过充分利用井点的低频和高频, 以及地震的中频部分, 有效地对分频反演结果的有效频带进行合理拓宽, 能够分辨出 5 m 的水合物薄层, 且水合物薄层的尖灭点比较清晰。因此, 通过分频反演结果能够较好地反映研究区天然气水合物矿体的展布形态。

#### 5.2 分析与讨论

研究区水合物分布为厚层状和薄层状, 厚层状水合物是研究区主力水合物层, 一般埋藏较深, 主要分布在海床下 100~200 m, 厚度也较厚, 单层厚度甚至可达 10~80 m, 厚层状的水合物主要为高饱和水合物, 其次为中饱和水合物, 可组成多期旋回。根据分频反演结果(图 10), 水合物在空间上具

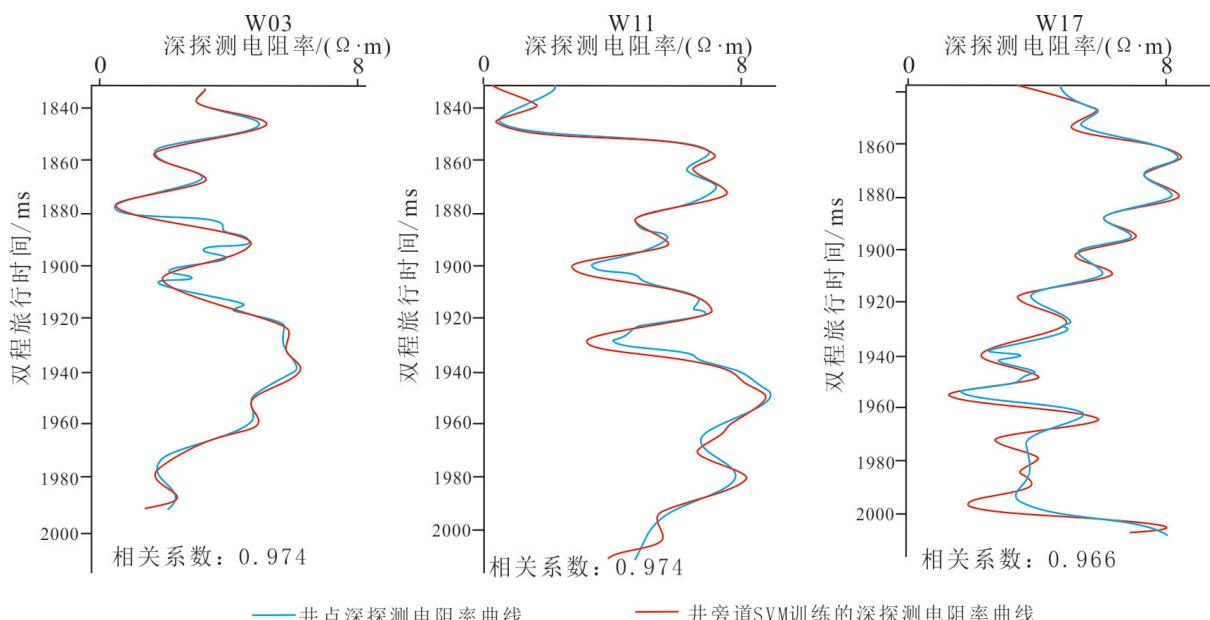


图 8 井旁道分频地震属性 SVM 训练结果与电阻率测井曲线对比

Fig.8 SVM training results compared with resistivity logging curves

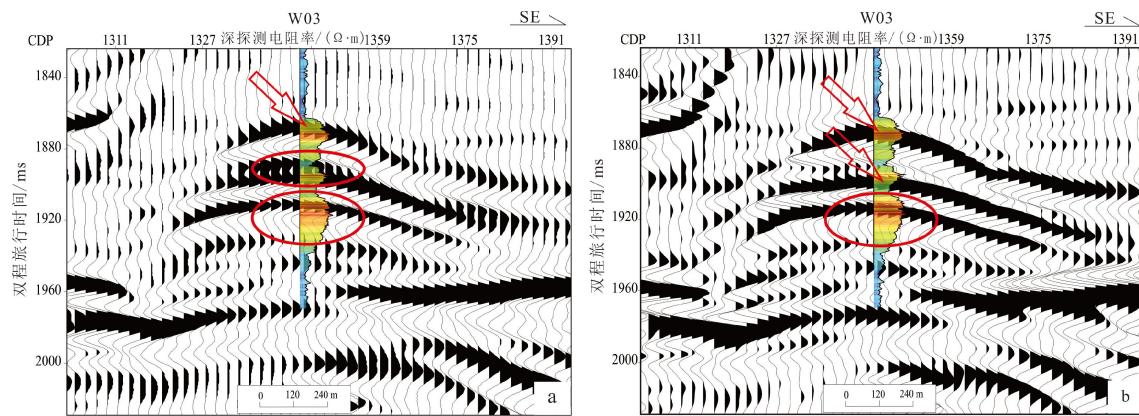


图 9 原始和 90° 相位剖面与井曲线对比

a. 原始地震剖面与深电阻率曲线对比, b. 90° 相位地震剖面深电阻率曲线对比。

Fig.9 Original seismic and 90° phase seismic profiles compared with well curves seismic section

a. original seismic corresponding to deep resistivity curve, b. 90 ° phase seismic corresponding to deep resistivity curve.

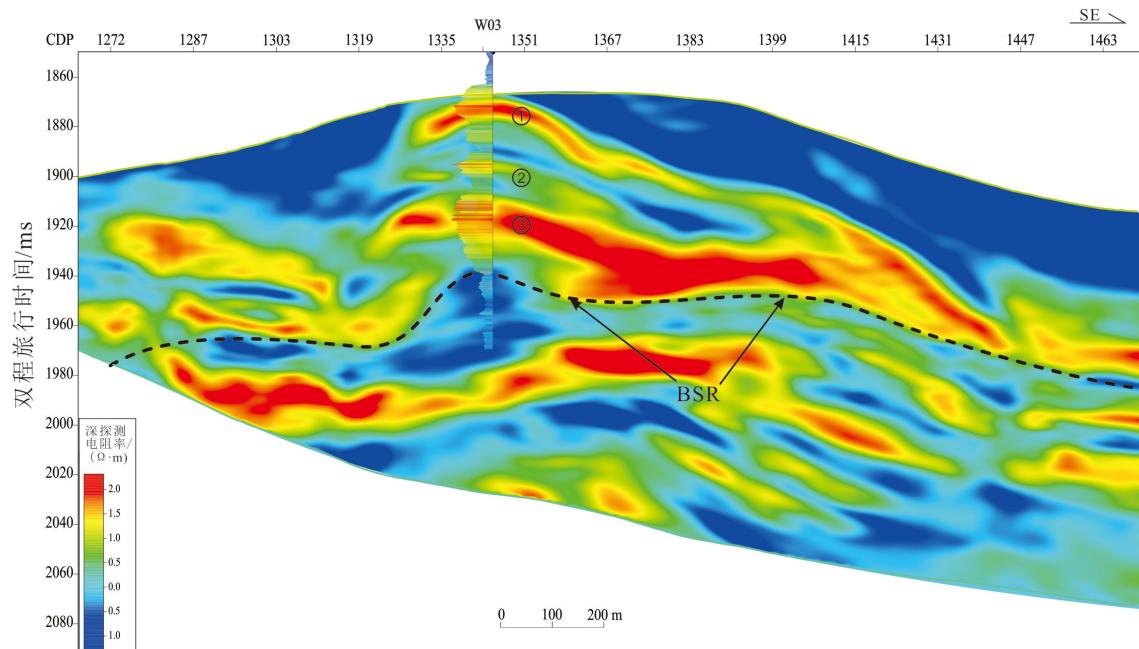


图 10 分频反演剖面与 W03 井深探测电阻率曲线

Fig.10 Frequency-division inversion profiles versus deep resistivity in the Well W03

有多层分布, 不论在垂向上还是在平面都具有分布不均匀的特征。厚层状水合物在横向上分布也较为稳定, 一般需要下部具有充足的气灶。薄层状水合物在神狐海域的每口井都均有分布, 分布较为广泛, 海床下几十米到几百米均有分布, 薄层状水合物分布较为分散, 埋藏较浅, 也有可能为厚层水合物的分支。根据反演结果, 可以看出位于该井处分布着 3 套水合物和天然气组合层。根据成像测井揭示和地震资料解释结果, 位于水合物沉积层顶部发育为一条 NE 向的高角度界面型断层, 该断层作为岩性界面对水合物起着遮挡作用, 并沟通了上下几套水合物层, 且有利于水合物的保存。

影响天然气水合物空间分布不均匀, 厚薄相间的原因除了具有水深和温压条件, 还受到气源、沉积环境和构造因素的影响<sup>[66-67]</sup>。

从始新世开始, 深部有机质热解成气, 在流体质的作用下沿着 NE、NW 和 NWW 向断层向上运移, 在低温高压条件下, 热解气和流体结合形成水合物, 气压充足, 水合物为厚层状, 为“流体运移通道型”水合物藏, 含有水合物地层的沉积速率一般都超过 30 m/Ma<sup>[68]</sup>。沉积环境是由于各种快速沉积和厚度大的冲积扇、斜坡扇及三角洲等沉积体系前缘、滑塌块体和等渗流沉积, 是水合物富集的有利沉积相带, 沉积物中的流体由于滑塌作用而受侧向

压实导致其他地方大量扩散,进而形成水合物<sup>[69]</sup>。有利于天然气水合物运移的构造条件为气烟囱和断层,气烟囱与BSR的平面分布范围有良好的空间匹配关系,剖面上表现为“下拉”的地震反射特征,由于地震波能量被吸收造成地震反射模糊或空白的效果,相对周围地层具有直立的通道形态,顶部常会发生横向扩张表现为花状或蘑菇状,气烟囱并没有延伸至海底,而是在BSR下部终止。深部的热

解成因气沿着切穿沉积盖层的断裂形成上升的气流体,顺着这些断层为深部气源向浅部运移提供了通道<sup>[70]</sup>,断层与BSR的发育具有良好的匹配关系(图11)。这种类型的水合物矿藏深部气源供给充足,稳定带厚度大,饱和度及丰度高,且分布规模及资源潜力巨大。其中深部气源供给、气烟囱和断裂等输导形成下生上储“流体运移通道型”天然气水合物矿藏的主控因素<sup>[71-72]</sup>。

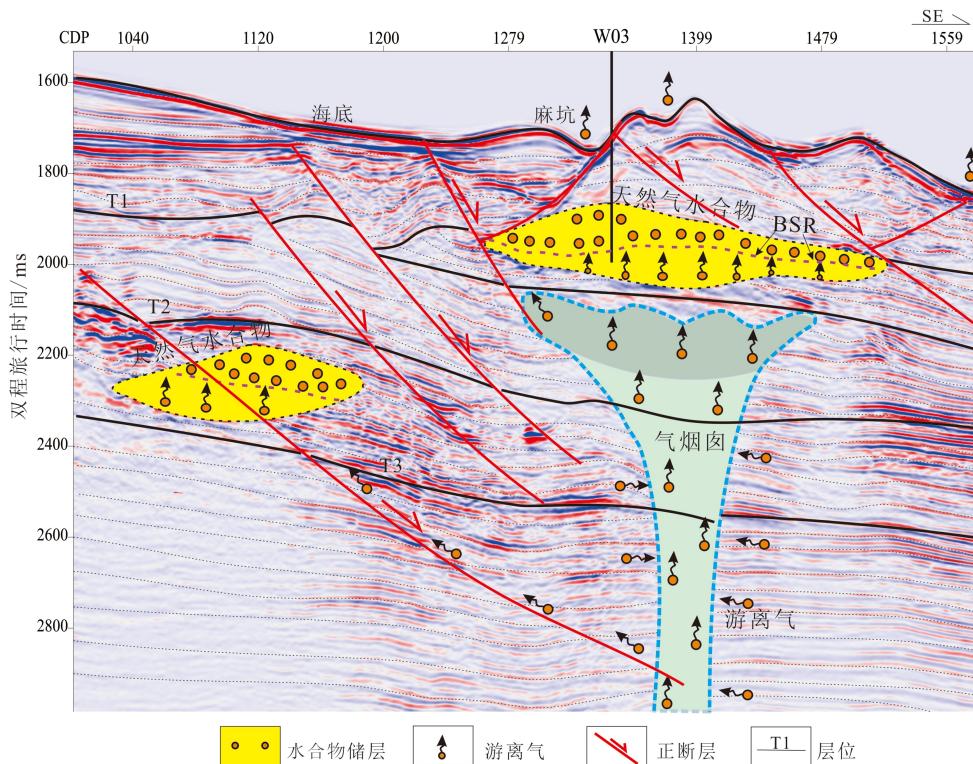


图11 神狐海域水合物成藏分布模式图

Fig.11 Accumulation distribution pattern of hydrate in the Shenhua area

晚中新世及上新世开始,位于深水海底浅层(100~230 mbsf)的未成岩沉积物中,来自原地浅层沉积物中有机质生物化学作用形成的生物甲烷烃气源,尚伴有少量深部热解气,构成了以生物气为主的混合气气源,通过扩散运聚作用方式形成“原地自生自储扩散型”的天然气水合物成藏模式。这种类型的水合物矿藏埋藏浅,水合物稳定带厚度薄,一般不超过200 m,水合物饱和度及丰度不太高,气源潜力及资源规模较小。其中浅层生物气及渗透性良好的储层是形成“原地自生自储扩散型”天然气水合物矿藏的主控因素<sup>[73]</sup>。

## 6 结论

(1)由支持向量机分频反演结果和井点的电阻

率测井曲线的吻合度,说明该反演方法在本区对天然气水合物刻画的适用性。结果表明,天然气水合物空间上具有分布不均匀的特征,厚层横向分布较为稳定,埋藏较深;薄层较为分散,埋藏较浅,可能为厚层水合物的分支。

(2)影响该区天然气水合物分布不均匀原因除了水深和温压条件外,主要受到气源、沉积环境和构造条件影响。晚中新世开始,构造运动频繁,将深部热解气沿着气烟囱和断层等纵向通道向上运移,形成厚层状“流体运移渗漏型”天然气水合物藏。海底沉积物中微生物作用成烃的生物气,通过渗透性良好的储层形成“原地自生自储扩散型”天然气水合物藏。

## 参考文献 (References)

- [1] Milkov A V, Sassen R. Thickness of the gas hydrate stability zone, Gulf of Mexico continental slope [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(9): 981-991.
- [2] Shankar U, Riedel M. Seismic and heat flow constraints from the gas hydrate system in the Krishna-Godavari Basin, India [J]. *Marine Geology*, 2010, 276(1-4): 1-13.
- [3] 徐华宁, 陆敬安, 梁金强. 珠江口盆地东部海域近海底天然气水合物地震识别及地质成因 [J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 57-65. [XU Huaning, LU Jing'an, LIANG Jinqiang. Seismic identification and geological origin of gas hydrate in near seafloor sediments in the eastern part of the Pearl River Mouth Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 57-65.]
- [4] 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. [MA Zaitian, GENG Jianhua, DONG Liangguo, et al. Seismic recognition studies on marine gas hydrate [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(1): 1-8.]
- [5] 钱进, 王秀娟, 董冬冬, 等. 基于叠前地震数据和岩石物理的游离气定量估算方法—以印度Krishna-Godavari盆地NGHP01-10A井为例 [J]. *地球物理学报*, 2016, 59(7): 2553-2563. [QIAN Jin, WANG Xiujuan, DONG Dongdong, et al. Quantitative assessment of free gas beneath gas hydrate stability zone from prestack seismic data and rock physics: a case of hole NGHP01-10A, Krishna-Godavari basin, India [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(7): 2553-2563.]
- [6] 苏丕波, 雷怀彦, 梁金强, 等. 南海北部天然气水合物成矿区的地球物理异常特征 [J]. 新疆石油地质, 2010, 31(5): 485-488. [SU Pibo, LEI Huaiyan, LIANG Jinqiang, et al. Geophysical anomaly characteristics of gas hydrate zone in Northern South China Sea [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2010, 31(5): 485-488.]
- [7] 徐华宁, 杨胜雄, 郑晓东, 等. 南中国海神狐海域天然气水合物地震识别及分布特征 [J]. *地球物理学报*, 2010, 53(7): 1691-1698. [XU Huaning, YANG Shengxiong, ZHENG Xiaodong, et al. Seismic identification of gas hydrate and its distribution in Shenu area, South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(7): 1691-1698.]
- [8] 沙志彬, 龚跃华, 梁金强. 地震属性剖面在天然气水合物识别中的应用 [J]. 南海地质研究, 2006(1): 105-113. [SHA Zhibin, GONG Yuehua, LIANG Jinqiang. How to judge gas hydrates seismic character from the different kinds of attribute profile [J]. *Geological Research of South China Sea*, 2006(1): 105-113.]
- [9] 吕琳, 王明君, 范继璋. 地震属性在天然气水合物识别中的应用 [J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(2): 596-601. [LV Lin, WANG Mingjun, FAN Jizhang. Seismic attribute recognition in the application of natural gas hydrate [J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(2): 596-601.]
- [10] 苏丕波, 梁金强, 张子健, 等. 神狐海域扩散型水合物在地震反射面上的“亮点”与“暗点”分析 [J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 51-56. [SU Pibo, LIANG Jinqiang, ZHANG Zijian, et al. Analysis on the bright spots and dim out of seismic section for diffusion-type hydrate in Shenu area [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 51-56.]
- [11] 靳佳澎, 王秀娟, 陈端新, 等. 基于测井与地震多属性分析神狐海域天然气水合物分布特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(5): 122-130. [JIN Jiapeng, WANG Xiujuan, CHEN Duanxin, et al. Distribution of gas hydrate in shenu area: identified with well log and seismic multi-attributes [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(5): 122-130.]
- [12] 刘婷婷, 童思友, 韩立国. 海洋天然气水合物属性提取 [J]. *世界地质*, 2017, 36(4): 1244-1251, 1267. [LIU Tingting, TONG Siyou, HAN Liguo. Seismic attribute extraction of marine gas hydrate [J]. *Global Geology*, 2017, 36(4): 1244-1251, 1267.]
- [13] 张宝金, 张光学, 耿建华, 等. 南海含天然气水合物地层速度反演方法探讨 [J]. 南海地质研究, 2008(1): 78-85. [ZHANG Baojin, ZHANG Guangxue, GENG Jianhua, et al. Discuss on the methods of velocity inversion of the stratum containing gas hydrates in South China Sea [J]. *Geological Research of South China Sea*, 2008(1): 78-85.]
- [14] 刘洁, 张建中, 孙运宝, 等. 基于地震谱反演的地层速度估算方法及应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(5): 909-915. [LIU Jie, ZHANG Jianzhong, SUN Yunbao, et al. Seismic velocity estimation method based on spectral inversion [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(5): 909-915.]
- [15] 张如伟, 李洪奇, 文鹏飞, 等. 海洋含水合物沉积层的速度频散与衰减特征分析 [J]. *地球物理学报*, 2016, 59(9): 3417-3427. [ZHANG Ruwei, LI Hongqi, WEN Pengfei, et al. The velocity dispersion and attenuation of marine hydrate-bearing sediments [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(9): 3417-3427.]
- [16] 杨睿, 吴能友, 雷新华, 等. 波阻抗反演在南海北部神狐海域天然气水合物勘探中的应用 [J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 495-500. [YANG Rui, WU Nengyou, LEI Xinhua, et al. Impedance inversion and its application in gas hydrate exploration in Shenu area, Northern South China Sea [J]. *Geoscience*, 2010, 24(3): 495-500.]
- [17] 杨瑞召, 李松楠, 王媛媛, 等. 无井约束反演在神狐海域水合物预测中的应用 [J]. 天然气地球科学, 2012, 23(4): 784-790. [YANG Ruizhao, LI Songnan, WANG Yuanyuan, et al. Application of inversion without well constraint to hydrate forecasting in Shenu area [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(4): 784-790.]
- [18] 徐云霞, 张宝金, 文鹏飞. 高密度速度分析方法在水合物无井约束波阻抗反演中的应用研究 [J]. *物探化探计算技术*, 2016, 38(4): 540-545. [XU Yunxia, ZHANG Baojin, WEN Pengfei. The application research of high density velocity analysis in hydrate impedance inversion without log constrain [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 38(4): 540-545.]
- [19] 薛花, 张宝金, 徐云霞, 等. 波阻抗反演在琼东南海域水合物检测中的应用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(2): 173-180. [XUE Hua, ZHANG Baojin, XU Yunxia, et al. Application of wave impedance inversion to gas hydrates prediction in Southeast Hainan Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(2): 173-180.]
- [20] 沙志彬, 郑涛, 杨木壮, 等. 基于波阻抗反演的天然气水合物地震检测技术 [J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 481-488. [SHA Zhibin, ZHENG Tao, YANG Muzhuang, et al. The seismic detecting technique on gas hydrates based on wave impedance inversion [J]. *Geoscience*, 2010,

- 24(3): 481-488.]
- [21] Rossi G, Gei D, Böhm G, et al. Attenuation tomography: An application to gas - hydrate and free - gas detection [J]. *Geophysical Prospecting*, 2007, 55(5): 655-669.
- [22] 宋海斌, Matsubayashi O, Shin'ichi K. 天然气水合物似海底反射层的全波形反演[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(1): 42-46. [SONG Haibin, Matsubayashi O, Shin'ichi K. Full waveform inversion of gas hydrate-related bottom simulating reflectors [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(1): 42-46.]
- [23] Song H B, Matsubayashi O, Uramoto S. Full waveform inversion of gas hydrate-related bottom simulating reflectors [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(1): 44-52.
- [24] Pecher I, Minshull T A, Singh S C, et al. Velocity structure of a bottom simulating reflector offshore Peru: Results from full waveform inversion [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 139(3-4): 459-469.
- [25] Minshull T A, Singh S C, Westbrook G K. Seismic velocity structure at a gas hydrate reflector, offshore western Colombia, from full waveform inversion [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99(B3): 4715-4734.
- [26] 刘学伟, 李敏峰, 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. [LIU Xuewei, LI Minfeng, ZHANG Yuwen, et al. Studies of seismic characteristics about gas hydrate: a case study of line HD152 in the South China Sea [J]. *Geoscience*, 2005, 19(1): 33-38.]
- [27] 孙运宝, 赵铁虎, 秦柯, 等. 基于谱反演估算神狐海域含水合物沉积层厚度[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(3): 54-61. [SUN Yunbao, ZHAO Tiehu, QIN Ke, et al. Time-frequency-based thickness estimation of hydrate-bearing layer in the Shenhua area of the South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(3): 54-61.]
- [28] 张建中, 刘晗, 黄忠来, 等. 基于同步挤压变换的水合物储层地震信号时频分析[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(6): 23-29. [ZHANG Jianzhong, LIU Han, HUANG Zhonglai, et al. A synchrosqueezing transform based time-frequency analysis on seismic signals of hydrate reservoirs [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(6): 23-29.]
- [29] 李军红, 刘洁, 张建中, 等. 利用地震谱反演技术圈定南海神狐海域天然气水合物储集层[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(6): 55-62. [LI Junhong, LIU Jie, ZHANG Jianzhong, et al. Delineation of natural gas hydrate reservoirs in Shenhua area of South China Sea using seismic spectral inversion technique [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(6): 55-62.]
- [30] 宋海斌, 松林修, 杨胜雄, 等. 海洋天然气水合物的地球物理研究(II): 地震方法[J]. *地球物理学进展*, 2001, 16(3): 110-118. [SONG Haibin, SONG Linxiu, YANG Shengxiong, et al. Geophysical researches on marine gas hydrates (II): seismic methods [J]. *Progress in Geophysics*, 2001, 16(3): 110-118.]
- [31] 刘彦君, 刘喜武, 刘大锰, 等. 地球物理技术在天然气水合物分布区预测中的应用[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(5): 566-573. [LIU Yanjun, LIU Xiwu, LIU Dameng, et al. Applications of geophysical techniques to gas hydrate prediction [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(5): 566-573.]
- [32] 阮爱国, 李家彪, 初凤友, 等. 海底天然气水合物层界面反射AVO数值模拟[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(6): 1826-1835. [RUAN Aiguo, LI Jiabiao, CHU Fengyou, et al. AVO numerical simulation of gas hydrates reflectors beneath seafloor [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(6): 1826-1835.]
- [33] Song H B, Matsubayashi O, Yang S X, et al. Physical property models of gas hydratebearing sediments and AVA character of bottom simulating reflector [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(4): 569-579.
- [34] Wang X C, Pan D Y. Application of AVO attribute inversion technology to gas hydrate identification in the Shenhua Area, South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 80: 23-31.
- [35] Lu S M, McMechan G A. Elastic impedance inversion of multichannel seismic data from unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas [J]. *Geophysics*, 2004, 69(1): 164-179.
- [36] 徐华宁, 张光学, 郑晓东, 等. 井震联合分析预测神狐海域天然气水合物可能的垂向分布[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(10): 3363-3372. [XU Huaning, ZHANG Guangxue, ZHENG Xiaodong, et al. Integrated analysis of well logs and seismic data to deduce the possible distribution in depth of gas hydrate in Shenhua Area, South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(10): 3363-3372.]
- [37] 吴淑玉, 刘俊, 肖国林, 等. 匹配追踪算法频谱分解的碎屑岩薄砂体储层预测: 以北黄海盆地东部坳陷下白垩统为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(3): 197-207. [WU Shuyu, LIU Jun, XIAO Guolin, et al. Thin clastic sand reservoir prediction based on matching pursuit spectrum decomposition-A case of eastern depression of North Yellow Sea Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(3): 197-207.]
- [38] Widess M B. How thin is a thin bed? [J]. *Geophysics*, 1973, 38(6): 1176-1180.
- [39] Morlet J, Arens G, Fourgeau E, et al. Wave propagation and sampling theory--Part I: Complex signal and scattering in multilayered media [J]. *Geophysics*, 1982, 47(2): 203-221.
- [40] Partyka G, Gridley J, Lopez J. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization [J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(3): 353-360.
- [41] Ren H T, Goloshubin G, Hilterman F J. Poroelastic analysis of permeability effects in thinly layered porous media [J]. *Geophysics*, 2009, 74(6): N49-N54.
- [42] 杨胜雄, 梁金强, 陆敬安, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征及主控因素新认识[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 1-14. [YANG Shengxiong, LIANG Jinqiang, LU Jing'an, et al. New understandings on the characteristics and controlling factors of gas hydrate reservoirs in the Shenhua area on the northern slope of the South China Sea [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 1-14.]
- [43] 梁金强, 张光学, 陆敬安, 等. 南海东北部陆坡天然气水合物富集特征及成因模式[J]. *天然气工业*, 2016, 36(10): 157-162. [LIANG Jinqiang, ZHANG Guangxue, LU Jing'an, et al. Accumulation characteristics and genetic models of natural gas hydrate reservoirs in the NE slope of the south china sea [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(10): 157-162.]
- [44] 沙志彬, 梁金强, 苏丕波, 等. 珠江口盆地东部海域天然气水合物钻

- 探结果及其成藏要素研究 [J]. 地学前缘, 2015, 22(6): 125-135. [SHA Zhibin, LIANG Jinqiang, SU Pibo, et al. Natural gas hydrate accumulation elements and drilling results analysis in the eastern part of the Pearl River mouth basin [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(6): 125-135.]
- [45] 余鹏, 李振春. 分频技术在储层预测中的应用 [J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(6): 419-423. [YU Peng, LI Zhenchun. Application of frequency-divided technique in reservoir prediction [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2006, 29(6): 419-423.]
- [46] 于建国, 韩文功, 刘力辉. 分频反演方法及应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(2): 193-197. [YU Jianguo, HAN Wengong, LIU Lihui. Frequency-divided inversion and application [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(2): 193-197.]
- [47] 龚洪林, 王振卿, 蔡刚, 等. 分频解释技术在碳酸盐岩储层预测中应用 [J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(S1): 5-9. [GONG Honglin, WANG Zhenqing, CAI Gang, et al. Application of separate frequency interpretation technique in prediction of carbonate reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(S1): 5-9.]
- [48] 余鹏, 李振春. 分频技术在表征牛9井区储层中的应用 [J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(3): 113-115. [YU Peng, LI Zhenchun. The application of frequency-divided technique in reservoir prediction [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, 36(3): 113-115.]
- [49] 季玉新, 刘春园, 陈冬, 等. 分频反演方法及其在塔河A区储层预测中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 38-42. [JI Yuxin, LIU Chunyuan, CHEN Dong, et al. Frequency-divided inversion and its application to reservoir prediction in block A of Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 38-42.]
- [50] 黄林军, 潘建国, 黄玉, 等. 分频反演技术在准东XIQ地区古沟谷薄砂层储层预测中的应用 [J]. 石油天然气学报, 2012, 34(11): 52-55. [HUANG Linjun, PAN Jianguo, HUANG Yu, et al. Application of frequency-divided inversion of thin sand layer prediction of ancient valley reservoir in XIQ area of eastern Jungar Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(11): 52-55.]
- [51] 王振卿, 王宏斌, 张虎权, 等. 分频波阻抗反演技术在塔中西部台内滩储层预测中的应用 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25(11): 1847-1854. [WANG Zhenqing, WANG Hongbin, ZHANG Huquan, et al. Frequency division inversion for the intraplatform shoal reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(11): 1847-1854.]
- [52] 张京思, 贺电波, 蔡少武, 等. 基于分频反演的油气预测技术及应用——以渤海C构造为例 [J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 886-891. [ZHANG Jingsi, HE Dianbo, CAI Shaowu, et al. Technology of oil-gas prediction based on frequency-divided inversion and its application-a case study from C structure of Bohai bay basin [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(2): 886-891.]
- [53] 陈志刚, 孙星, 刘雷颂, 等. 低频地震资料分频反演在滨里海盆地中区块的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(S2): 261-265. [CHEN Zhigang, SUN Xing, LIU Leisong, et al. Frequency-segmented inversion based on low-frequency seismic data in the central block of Pre-Caspian Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(S2): 261-265.]
- [54] 王彬, 牛聪, 李勇, 等. 基于广义S变换的分频反演在南海深水区油气勘探中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2019, 34(6): 2508-2514. [WANG Bin, NIU Cong, LI Yong, et al. Application of frequency division inversion based on generalized S transform in oil and gas exploration in deep water area of South China sea [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(6): 2508-2514.]
- [55] 刘俊. 南海珠江口盆地白云凹陷及邻区综合地球物理研究 [D]. 杭州: 国家海洋局第二海洋研究所, 2008. [LIU Jun. The integrated geophysical study of Baiyun Sag and its peripheral areas of the Pearl River Mouth Basin in South China Sea [D]. Hangzhou: Second institution of Oceanography, 2008.]
- [56] 苏丕波, 梁金强, 沙志彬, 等. 神狐深水海域天然气水合物成藏的气源条件 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(2): 1-8. [SU Pibo, LIANG Jinqiang, SHA Zhibin, et al. Gas sources condition of gas hydrate formation in Shenhua deep water sea zone [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2014, 36(2): 1-8.]
- [57] 王宏斌, 张光学, 杨木壮, 等. 南海陆坡天然气水合物成藏的构造环境 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(1): 81-86. [WANG Hongbin, ZHANG Guangxue, YANG Muzhuang, et al. Structural circumstance of gas hydrate deposition in the continental margin, the South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(1): 81-86.]
- [58] 姚伯初, 杨木壮. 南海晚新生代构造运动与天然气水合物资源 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(4): 93-100. [YAO Bochu, YANG Muzhuang. Tectonic movements in the late cenozoic and gas hydrate resources in the South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(4): 93-100.]
- [59] 孙珍, 庞雄, 钟志洪, 等. 珠江口盆地白云凹陷新生代构造演化动力学 [J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 489-498. [SUN Zhen, PANG Xiong, ZHONG Zhihong, et al. Dynamics of tertiary tectonic evolution of the Baiyun sag in the pearl river mouth basin [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 489-498.]
- [60] 王静丽, 梁金强, 宗欣, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物差异性分布的控制因素 [J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(1): 24-30. [WANG Jingli, LIANG Jinqiang, ZONG Xin, et al. Differentiated distribution of methane hydrate in the shenhua area of the northern south china sea and controlling factors [J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(1): 24-30.]
- [61] 何家雄, 卢振权, 张伟, 等. 南海北部珠江口盆地深水区天然气水合物成因类型及成矿成藏模式 [J]. 现代地质, 2015, 29(5): 1024-1034. [HE Jiaxiong, LU Zhenquan, ZHANG Wei, et al. Biogenetic and Sub-biogenetic gas resource and genetic types of natural gas hydrates in Pearl River Mouth Basin, Northern area of South China Sea [J]. Geoscience, 2015, 29(5): 1024-1034.]
- [62] Zhang W, Liang J Q, Lu J A, et al. Accumulation features and mechanisms of high saturation natural gas hydrate in Shenhua Area, northern South China Sea [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 708-719.
- [63] 王康宁. 高分辨率叠后反演方法研究及在塔河某区的应用 [D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2010. [WANG Kangning. The research of high-resolution post-stack inversion methods and application in Tahe oil field [D]. Master Dissertation of China University of Geoscience (Beijing), 2010.]
- [64] 周东红, 张志军, 谭辉煌. 基于谱反演的超限厚储层描述技术及其在

- 渤海海域“富砂型”极浅水三角洲储集层的应用 [J]. 中国海上油气, 2015, 27(3): 25-30. [ZHOU Donghong, ZHANG Zhijun, TAN Huihuang. Super-thick reservoir characterization technique based on spectral inversion and its application on extremely shallow sand-rich delta, Bohai sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(3): 25-30.]
- [65] 高磊, 江涛, 王明春, 等. “富砂型”浅水三角洲储层预测及其油气成藏模式分析: 以渤海西部沙垒田凸起明下段为例 [J]. *物探化探计算技术*, 2018, 40(1): 27-35. [GAO Lei, JIANG Tao, WANG Mingchun, et al. Reservoir prediction of "rich sand" shallow delta and hydrocarbon accumulation pattern analysis-a case of Shaleitian salient lower member of Minghuazhen in the western Bohai sea [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 40(1): 27-35.]
- [66] 许威, 邱楠生, 孙长宇, 等. 南海天然气水合物稳定带厚度分布特征 [J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 467-473. [XU Wei, QIU Nansheng, SUN Changyu, et al. The distribution characteristics of the thickness of gas hydrate stability zone in South China Sea [J]. *Geoscience*, 2010, 24(3): 467-473.]
- [67] 吴能友, 梁金强, 王宏斌, 等. 海洋天然气水合物成藏系统研究进展 [J]. *现代地质*, 2008, 22(3): 356-362. [WU Nengyou, LIANG Jingqiang, WANG Hongbin, et al. Marine gas hydrate system: state of the art [J]. *Geoscience*, 2008, 22(3): 356-362.]
- [68] 龚跃华, 杨胜雄, 王宏斌, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征 [J]. *现代地质*, 2009, 23(2): 210-216. [GONG Yuehua, YANG Shengxiong, WANG Hongbin, et al. Gas hydrate reservoir characteristics of Shenhua Area, North slope of the South China Sea [J]. *Geoscience*, 2009, 23(2): 210-216.]
- [69] 曾小明, 于兴河, 王建忠, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物分布的主控因素 [J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(10): 31-40. [ZENG Xiaoming, YU Xinghe, WANG Jianzhong, et al. Controlling factors of natural gas hydrate in the North of Shenhua Area, South China Sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(10): 31-40.]
- [70] 龚跃华, 吴时国, 张光学, 等. 南海东沙海域天然气水合物与地质构造的关系 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(1): 99-104. [GONG Yuehua, WU Shiguo, ZHANG Guangxue, et al. Relation between gas hydrate and geologic structures in Dongsha Islands Sea area of South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(1): 99-104.]
- [71] 何家雄, 卢振权, 苏丕波, 等. 南海北部天然气水合物气源系统与成藏模式 [J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(6): 8-24. [HE Jiaxiong, LU Zhenquan, SU Pibo, et al. Source supply system and reservoir forming model prediction of natural gas hydrate in the deep water area of the Northern South China Sea [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2016, 38(6): 8-24.]
- [72] 吴能友, 杨胜雄, 王宏斌, 等. 南海北部陆坡神狐海域天然气水合物成藏的流体运移体系 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52(6): 1641-1650. [WU Nengyou, YANG Shengxiong, WANG Hongbin, et al. Gas-bearing fluid influx sub-system for gas hydrate geological system in Shenhua Area, Northern South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(6): 1641-1650.]
- [73] 吴能友, 张海敏, 杨胜雄, 等. 南海神狐海域天然气水合物成藏系统初探 [J]. *天然气工业*, 2007, 27(9): 1-6. [WU Nengyou, ZHANG Haiqi, YANG Shengxiong, et al. Preliminary discussion on Natural Gas Hydrate (NGH) reservoir system of Shenhua area, north slope of South China Sea [J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(9): 1-6.]