



天然气水合物地层剪切模量参数岩石物理计算及叠前反演

刘欣欣, 王小杰, 徐华宁, 杨 睿, 刘 鸿, 陈江欣

Rock physics calculation and pre-stack inversion of shear modulus parameters for natural gas hydrate-bearing sediments

LIU Xinxin, WANG Xiaojie, XU Huaning, YANG Rui, LIU Hong, and CHEN Jiangxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024100802>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

波形反演在天然气水合物中的应用研究进展

Application of full waveform inversion to gas hydrate research

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(4): 207–221

南海神狐海域非均质性天然气水合物储层的分频反演

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

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 106–120

海洋天然气水合物储层特性及其资源量评价方法

Characteristics of marine gas hydrate reservoir and its resource evaluation methods

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 44–57

储层和开采参数对天然气水合物开采产能的影响分析

The influence of reservoir and exploitation parameters on production capacity of gas hydrate

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(6): 202–216

海洋天然气水合物储层蠕变行为的主控因素与研究展望

Controlling factors and research prospect on creeping behaviors of marine natural gas hydrate-bearing-strata

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 3–11

天然气水合物微观测试技术与应用进展

Advances in microscopic testing techniques and applications for natural gas hydrates

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(3): 136–148



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘欣欣, 王小杰, 徐华宁, 等. 天然气水合物地层剪切模量参数岩石物理计算及叠前反演[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(6): 60-70.

LIU Xinxin, WANG Xiaojie, XU Huaning, et al. Rock physics calculation and pre-stack inversion of shear modulus parameters for natural gas hydrate-bearing sediments[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(6): 60-70.

天然气水合物地层剪切模量参数岩石物理计算及叠前反演

刘欣欣^{1,2}, 王小杰^{1,2}, 徐华宁^{1,2}, 杨睿^{1,2}, 刘鸿^{1,2}, 陈江欣^{1,2}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

2. 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

摘要: 利用地震资料进行天然气水合物识别, 需要解决两个重要问题, 一是建立含天然气水合物地层的弹性参数与水合物物性参数之间的定量关系; 二是建立地震叠前数据与弹性参数之间的定量关系。针对上述问题, 本文从神狐海域天然气水合物的微观赋存形态出发, 重点考虑水合物的非零剪切模量特征, 利用非耦合微分有效介质 (DEM) 理论、斑块饱和理论进行岩石物理建模, 建立了天然气水合物饱和度与弹性参数之间的非线性关系, 并通过弹性参数的敏感性分析以及交会分析, 确定了剪切模量对水合物含量有较好的指示作用; 使用叠前贝叶斯地震反演方法, 从叠前地震数据中提取水合物剪切模量参数, 结果与 SH2 站位测井数据有较好的一致性, 有效地进行了天然气水合物识别。本方法可为海域天然气水合物识别和预测提供有力的技术支持。

关键词: 天然气水合物; 岩石物理; 剪切模量; 地震反演

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024100802

Rock physics calculation and pre-stack inversion of shear modulus parameters for natural gas hydrate-bearing sediments

LIU Xinxin^{1,2}, WANG Xiaojie^{1,2}, XU Huaning^{1,2}, YANG Rui^{1,2}, LIU Hong^{1,2}, CHEN Jiangxin^{1,2}

1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resource, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China

Abstract: To accurately estimate gas hydrate content using seismic data, two key problems are needed to be solved: the first is to establish the quantitative relationship between the elastic parameters and physical parameters of hydrate-bearing sediments; the second is to establish the quantitative relationship between seismic pre-stack data and the elastic parameters. In view of the above problems, we combined the microscopic structure of gas hydrate-bearing sediments in Shenhu area on the focus of its characteristics of non-zero shear modulus, used the uncoupled differential effective medium (DEM) theory and patchy saturation theory to carry out the modeling of rock physics, and established the nonlinear relationship between gas hydrate saturation and elastic parameters. Through the analysis of sensitivity and crossplots of elastic parameters, we determined that the shear modulus is a good indicator to the hydrate content. Using the pre-stack Bayesian seismic inversion method, the shear modulus of hydrate-bearing sediments were extracted from the pre-stack seismic data, and the natural gas hydrate was effectively identified. The method in this study can provide a technical support for the identification and prediction of natural gas hydrate in sea areas.

Key words: gas hydrate; rock physics; shear modulus; seismic inversion

天然气水合物是一种重要的战略能源和潜在未来能源, 准确地探明中国的天然气水合物资源储量, 有效地进行水合物资源的勘探开发, 具有非常

重要的战略意义、环境意义和经济意义。地震勘探是天然气水合物识别和预测的重要手段之一。地震资料上似海底反射层 (BSR)、振幅空白带以及极

资助项目: 国家自然科学基金“南海北部高富集天然气水合物储层特征与成藏控制机理研究”(U2244224), “西太平洋多圈层相互作用数据集成研究”(92358303); 山东省自然科学基金“天然气水合物频变衰减特征定量研究”(ZR2022MD029), “跨频带融合天然气水合物储层检测研究”(ZR2021MD118)

作者简介: 刘欣欣 (1985—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事海洋地震资料处理与解释技术方法研究, E-mail: xxinl@126.com

收稿日期: 2024-10-08; **改回日期:** 2024-12-04. 张现荣编辑

性反转等地震反射特征^[1-2], 通常作为海域水合物储层的重要识别标志。地震反射主要是由储层波阻抗差异引起的, 但在特定条件下岩性变化或者不整合面等原因也可能造成波阻抗差异, 引起类似的地震响应。地震剖面上 BSR 常见于海域斜坡或者浅部海底沉积地层上, 但在一些发现水合物的区域, 并未表现出明显的 BSR 特征^[3], 如墨西哥湾、中国南海北部陆坡西部区域等, 而且不同类型水合物储层的 BSR 特征也有较大差异^[4-5]。BSR 等地震反射特征与水合物地层并非一一对应关系, 仅依靠地震反射特征难以准确识别天然气水合物^[6], 这对海域水合物储层的地震识别和预测提出了更高的要求。

天然气水合物的微观赋存形态是影响其储层特性的主要因素^[7-8]。为提高水合物识别和预测的可靠性, 一个重要的途径是从地震数据中准确提取天然气水合物地层的物性信息, 为此需要解决两个关键问题: 第一个问题是如何建立储层宏观弹性特征(包括体积模量、剪切模量、纵波速度、横波速度、密度等)与天然气水合物微观结构之间的定量关系。岩石物理建模是建立该定量关系的重要手段, 目前应用较多的岩石物理模型包括适用于固结海洋沉积物的胶结模型^[9-10]和等效介质模型^[11-12]以及适用于未固结海洋沉积物的接触理论^[13-15]等。这些岩石物理模型各自具有不同的假设条件和适用条件。水合物的微观赋存形态会因沉积环境的不同而显著变化, 实验研究表明, 水合物的存在会增强地层的剪切强度^[16]。考虑水合物微观赋存形态及剪切性质的岩石物理型有待进一步研究。

第二个问题是如何建立水合物储层地震信息

(包括振幅、相位、频率等动力学特征以及 BSR、振幅空白带等地球物理响应)与弹性参数之间定量关系。地震反演方法是天然气水合物探测的有效技术手段之一。弹性阻抗反演^[17-23]、AVO(Amplitude variation with offset, 振幅随偏移距的变化)及 AVA(Amplitude variation with angle, 振幅随入射角度的变化)反演方法^[24-26]以及全波形反演^[27-28]等地震反演方法已在天然气水合物探测中取得了成功应用。然而, 天然气水合物地层的宏观和微观结构高度复杂、非均质性强, 成藏模式随不同区域而变化, 基于地震数据进行水合物地层物性信息的定量反演仍存在一定的多解性^[29-30], 这对水合物的定量解释和勘探提出了挑战。目前流体识别的叠前地震反演方法日趋完善, 并在多个地区取得了较好的应用效果^[31], 而水合物地层的微观赋存形态以及宏观沉积环境区别于常规含流体储层, 因此此类反演方法在水合物地层的应用还有待进一步研究。

针对第一个问题, 本文根据海域天然气水合物的微观结构特征, 在岩石物理建模的框架下, 考虑水合物非零剪切模量的特征, 使用基于非耦合微分有效介质(DEM)理论和斑块饱和理论进行岩石物理建模, 计算水合物地层物性参数与弹性参数的定量关系; 针对第二个问题, 在岩石物理分析的基础上, 使用叠前贝叶斯地震反演方法, 从叠前地震数据中提取水合物地层的剪切模量参数。实际应用结果表明, 剪切模量对水合物含量有较好的指示性。本文的方法对水合物储层的识别提供了方法和技术支撑, 对后续水合物物性参数定量反演提供新的思路。

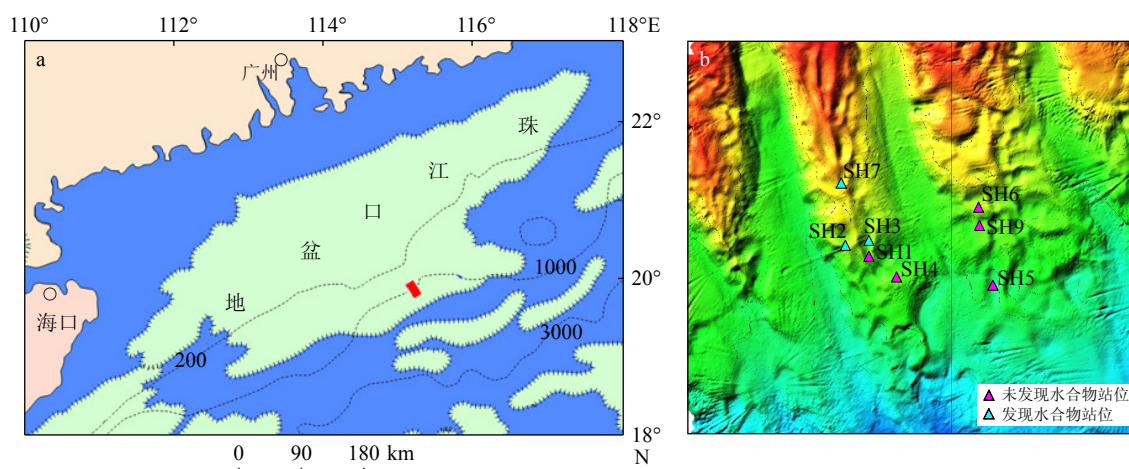


图 1 研究区位置图

a: 神狐海域研究区构造(红色方块), b: 研究区内水合物钻探站位分布

Fig.1 The location of the study area

a: The tectonic map of the Shenhu area (red square), b: the distribution of hydrate drilling stations in the red square (enlarged)

1 工区概况

神狐海域位于南海北部陆坡神狐暗沙东南海域附近(图 1), 水合物钻探区水深为 1 000~1 500 m, 新生代沉积厚度达 1 000~7 000 m, 具有扩散型天然气水合物的成藏系统。适宜的温压条件、丰富的气源供给, 加之底辟构造、高角度断裂和垂向裂隙系统等有利的运移通道, 为水合物发育创造了良好的条件^[32]。2006 年, 广州海洋地质调查局在此区域实施了三维地震采集, 2007 年完成了中国首次天然气水合物钻探, 成功获取了天然气水合物的实物样品。

神狐海域水合物稳定带受到周围温压条件限制, 含水合物沉积层基本上位于海底以下 135~230 m, 分布于强振幅 BSR 的上覆沉积地层中^[33], 大部分 BSR 与地层斜交, 波形极性与海底同相轴极性相反, 且上部发育弱振幅或者振幅空白带^[34](图 2)。横向上 BSR 反射振幅及垂向上 BSR 厚度均存在一定变化, 主要是由于地层的孔隙度、渗透率等物性差异导致水合物饱和度不同而造成的。

2 弹性参数计算

针对前述的第一个问题, 本文采用岩石物理建模的方法, 建立地层宏观弹性参数与天然气水合物微观结构之间的定量关系。陆红锋等^[35]对岩芯进行了 X 射线衍射成分分析, 指出神狐海域沉积物组分以碎屑矿物、黏土矿物和碳酸盐矿物为主, 并给出了各组分的含量, 据此假设岩石基质由方解石、

石英、黏土等组成。水合物含量主要受地层岩性、孔隙的微观结构及表面性质的影响^[8], 神狐海域水合物主要分散状分布于矿物颗粒的孔隙中^[36-37], 由于南海沉积物中存在大量有孔虫壳体, 水合物主要占据有孔虫壳体内部空间并堵塞了孔隙间的连通喉道, 显著降低了沉积物的气、水渗透能力^[38]; 研究还发现, 黏土含量的增加会导致被黏土颗粒束缚的孔隙水含量也随之增加^[39]。据此考虑孔隙几何形状和连通性, 假设地层中孔隙空间包含不连通的束缚水孔隙以及连通的硬币状孔隙和椭球形孔隙, 其中硬币状孔隙纵横比较小, 受到压力易趋向于闭合, 连通性较差, 而椭球形孔隙纵横比较大, 连通性较好。孔隙空间中可能存在水合物、游离气和水共存的情况^[40], 该地区的水合物呈现出典型的 I 型结构, 甲烷气体的含量超过 99.3%^[41], 据此, 结合前人对水合物微观结构的研究结果(图 3a、b), 将水合物地层等效为图 3c 所示的等效介质。

在地震岩石物理建模的理论框架下建立天然气水合物地层的岩石物理模型(主要流程见图 4):

① 利用 Hashin-Shtrikman-Walpole 界限^[43]将矿物组分混合形成颗粒基质。

② 在基质中加入充填束缚水的不连通孔隙, 作为新的基质。束缚水孔隙纵横比假设为 0.1。根据 Kuster-Toksöz 模型计算基质中加入束缚水孔隙之后的弹性参数:

$$\begin{aligned} & (K - K_{gr})(K + 4R_{gr}/3)^{-1}(K_{gr} + 4R_{gr}/3) = \\ & \phi_{wc}(K_w - K_{gr})P^{wc} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $K = (K, \mu)$, K 、 μ 分别为基质中加入束缚水孔隙之后的体积模量和剪切模量; $K_{gr} = (K_{gr}, \mu_{gr})$,

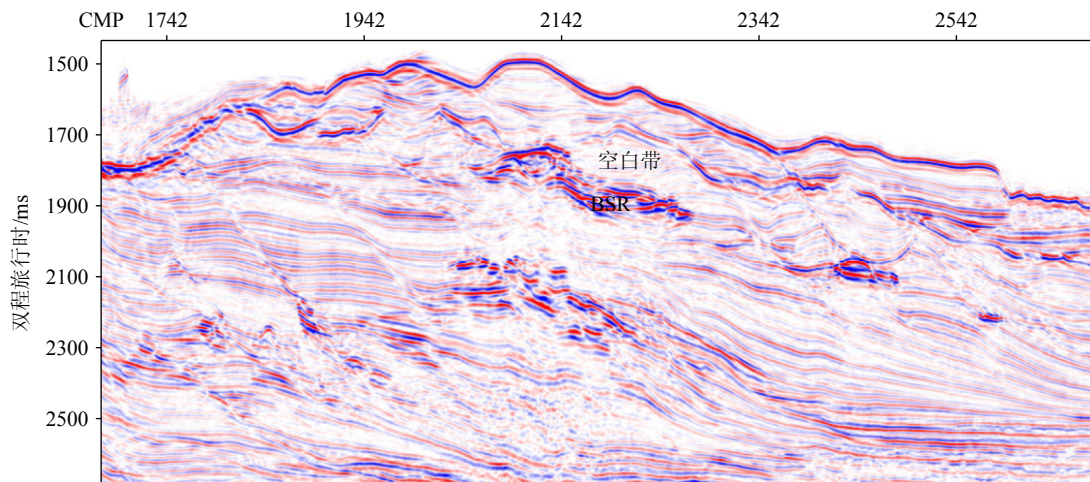
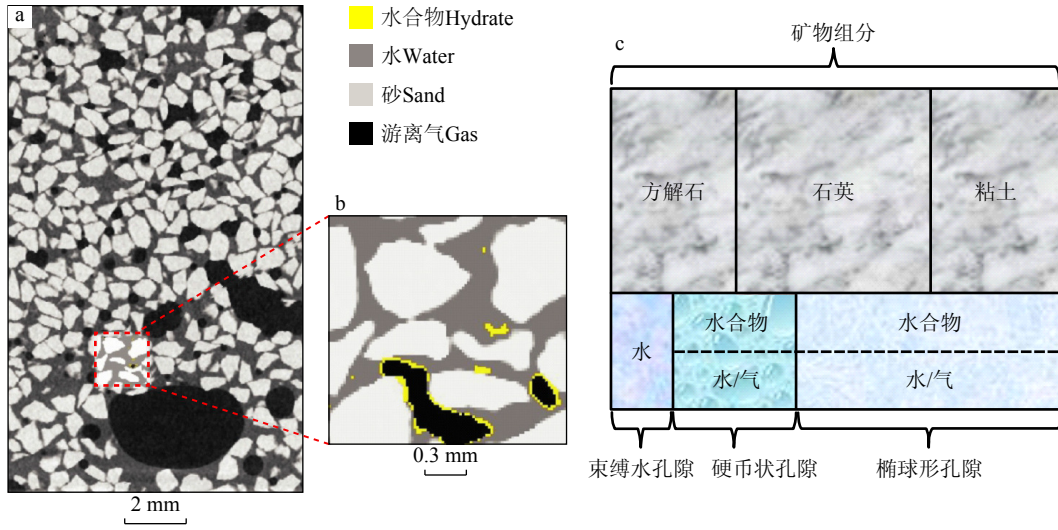


图 2 神狐海域典型地震反射剖面

Fig.2 A typical seismic reflection profile in the Shenhu area

图 3 实验室获取的水合物 CT 图像^[42] 及水合物等效介质模型

a: 原始图像, b: 对 a 图红色框线内区域进行灰度分析、着色后放大图, c: 等效介质模型。

Fig.3 CT images of gas hydrate obtained in laboratory and equivalent medium model of gas hydrate-bearing sediments

a: Original image, b: enlarged image of the area in the red frame after grey analysis and coloring, c: equivalent medium model of gas hydrate-bearing sediments.

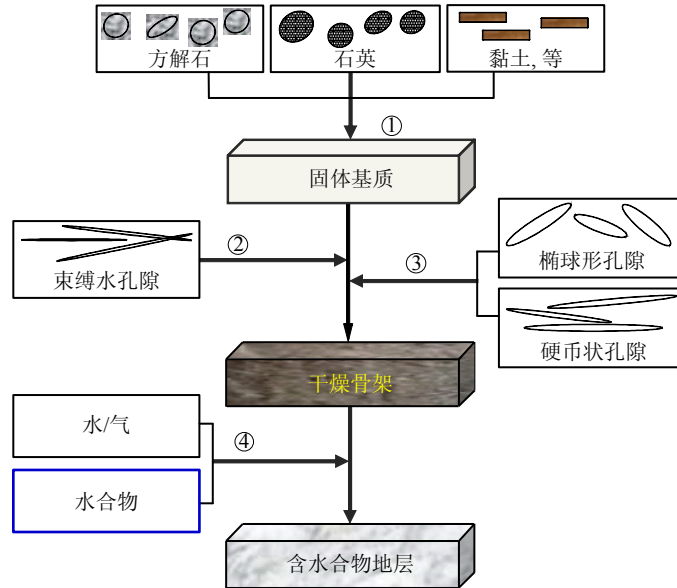


图 4 水合物地层岩石物理建模流程示意图

Fig.4 Flowchart of the rock physics modelling

$K_w = (K_w, \mu_w)$ 分别为岩石基质和水的弹性模量; ϕ_{wc} 为束缚水孔隙的孔隙度, $R = \left(\mu, \frac{\mu}{8} \frac{9K + 8\mu}{K + 2\mu} \right)$; 系数 $P^{wc} = (P^{wc}, Q^{wc})$ 是几何因子, 由孔隙纵横比确定。

③ 利用非耦合 DEM 模型^[44] 向②得到的基质中加入干燥的硬币状孔隙和椭圆形孔隙, 形成干燥骨架:

$$K_d(\phi) = K_1(1 - \phi)^{(P^0 + P^1)} e^{P^1 \phi} \quad (2)$$

$$\mu_d(\phi) = \mu_1(1 - \phi)^{(Q^0 + Q^1)} e^{Q^1 \phi} \quad (3)$$

其中, K_d 和 μ_d 分别是干燥骨架的体积模量和剪切

模量; $P^0 = \frac{A_1}{A_4}$, $P^1 = \frac{A_2 A_4 - A_1 A_5}{A_4^2}$, $Q^0 = \frac{C_1}{C_4} + \frac{D_1}{D_4}$, $Q^1 = \frac{C_2 C_4 - C_1 C_5}{C_4^2} + \frac{D_2 D_4 - D_1 D_5}{D_4^2}$, $A_1, A_2, \dots, A_5$, $C_1, C_2, \dots, C_5$ 和 $D_1, D_2, \dots, D_5$ 等是与固体基质和孔隙纵横比有关的参数, 具体表达式见文献^[44]。根据 Xu 和 White(1995) 的岩石物理建模思想^[45], 假设硬币状孔隙的孔隙度与黏土体积含量成正比, 其余的孔隙为椭圆形孔隙。

④ 利用广义 Gassmann 方程^[46] 将水合物填充到硬币状孔隙中, 形成水合物斑块:

$$K_s^{-1} = K_d^{-1} - (K_d^{-1} - K_m^{-1})^2 [\phi(K_{if}^{-1} - K_\phi^{-1}) + (K_d^{-1} - K_m^{-1})]^{-1} \quad (4)$$

$$\mu_s^{-1} = \mu_d^{-1} - (\mu_d^{-1} - \mu_m^{-1})^2 [\phi(\mu_{if}^{-1} - \mu_\phi^{-1}) + (\mu_d^{-1} - \mu_m^{-1})]^{-1} \quad (5)$$

其中, μ_s 是水合物充填斑块的剪切模量, K_ϕ 和 μ_ϕ 分别是与孔隙相关的体积模量和剪切模量, K_{if} 和 μ_{if} 分别是第 i 种孔隙充填物的体积和剪切模量。利用广义 Gassmann 方程可以得到固体(如有机质、水合物等)充填于孔隙情况下的饱和岩石的弹性模量。

利用 Gassmann 方程将水/气填充到椭球形孔隙中, 形成水/气斑块; 最后, 利用斑块饱和模型^[47] 和 Reuss 平均^[48] 将水合物斑块和水/气斑块混合, 形成饱和岩石:

$$K_R = \left\langle (K + 4\mu/3)^{-1} \right\rangle^{-1} - 4\mu/3 \quad (6)$$

$$\mu_R = \left(\sum_{i=1}^N f_i / \mu_i \right)^{-1} \quad (7)$$

其中, K_R 和 μ_R 分别表示饱和沉积物的等效体积和剪切模量; f_i 为其体积含量; $\langle \cdot \rangle$ 表示对每个斑块按体积含量进行加权平均; μ_i 为第 i 个斑块的剪切模量。

根据上述岩石物理模型计算水合物地层的弹

性参数。假设地层的矿物组分为石英和黏土, 孔隙度为 35%, 硬币状和椭球形孔隙的纵横比分别假设为 0.04 和 0.35, 孔隙中充填水合物和水, 选取的其余弹性常数如表 1 所示。剪切模量和纵波速度随水合物剪切模量的变化如图 5 所示, 两者都随水合物剪切模量的增大而增大, 水合物饱和度越高, 地层剪切模量随水合物剪切模量的变化越大。

使用下式计算弹性参数对水合物含量的敏感性评价指标:

$$D_{S_i} = \left| \frac{P_{S_i} - P_{S_0}}{P_{S_0}} \right| \quad (8)$$

其中, D_{S_i} 和 P_{S_i} 分别表示水合物饱和度为 S_i 时的敏感性评价指标和弹性参数; P_{S_0} 表示地层不含水合物时的弹性参数。计算不同弹性参数对水合物含量的敏感性评价指标(图 6)发现, 纵波速度、横波速度、泊松比、体积模量和剪切模量等弹性参数对水合物含量都有一定的敏感性, 但是泊松比的敏感性较低, 纵波速度和横波速度对水合物含量的敏感性相当, 剪切模量对水合物含量的敏感性最高。这与数值计算的结论是一致的, 也证明了使用剪切模量参数来识别水合物的可行性。

表 1 数值计算所选用的弹性常数

Table 1 The elastic constants used for numerical calculation

组分	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	密度/(g/cm ³)	来源
石英	37.0	44.0	2.65	Carmichale, 1989
黏土	21.0	7.0	2.60	Tosaya and Nur, 1982
水合物	7.7	3.2	0.91	Waite et al, 2000
水	2.25		1000	

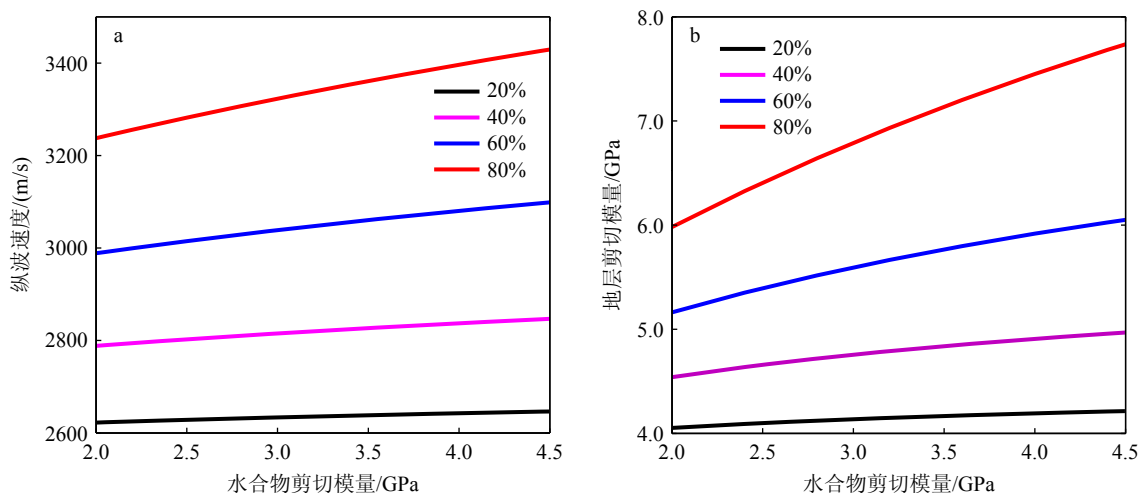


图 5 水合物地层纵波速度 (a) 和剪切模量 (b) 随水合物剪切模量的变化

Fig.5 P-wave velocity (a) and shear modulus (b) of gas hydrate-bearing sediments versus shear modulus of gas hydrate component

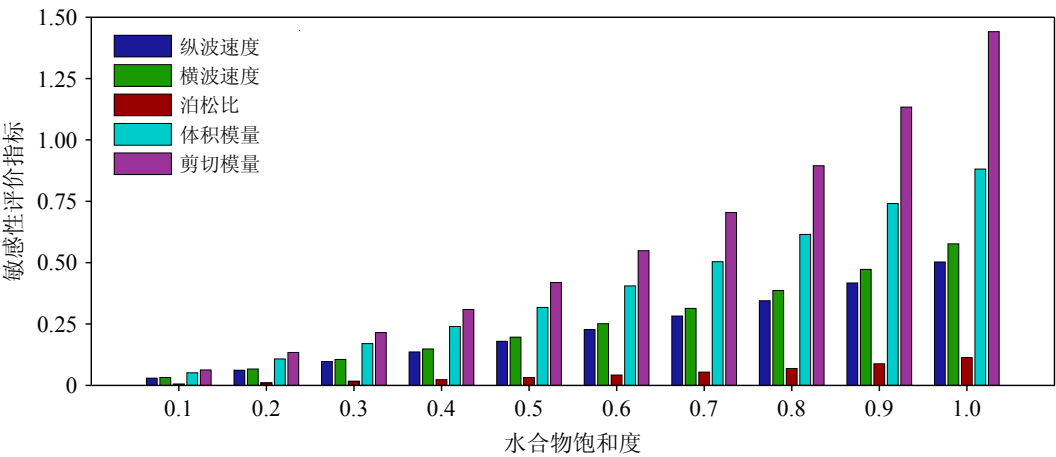


图 6 不同弹性参数的敏感性评价指标

Fig.6 Sensitivity indicator for hydrate content of different elastic parameters

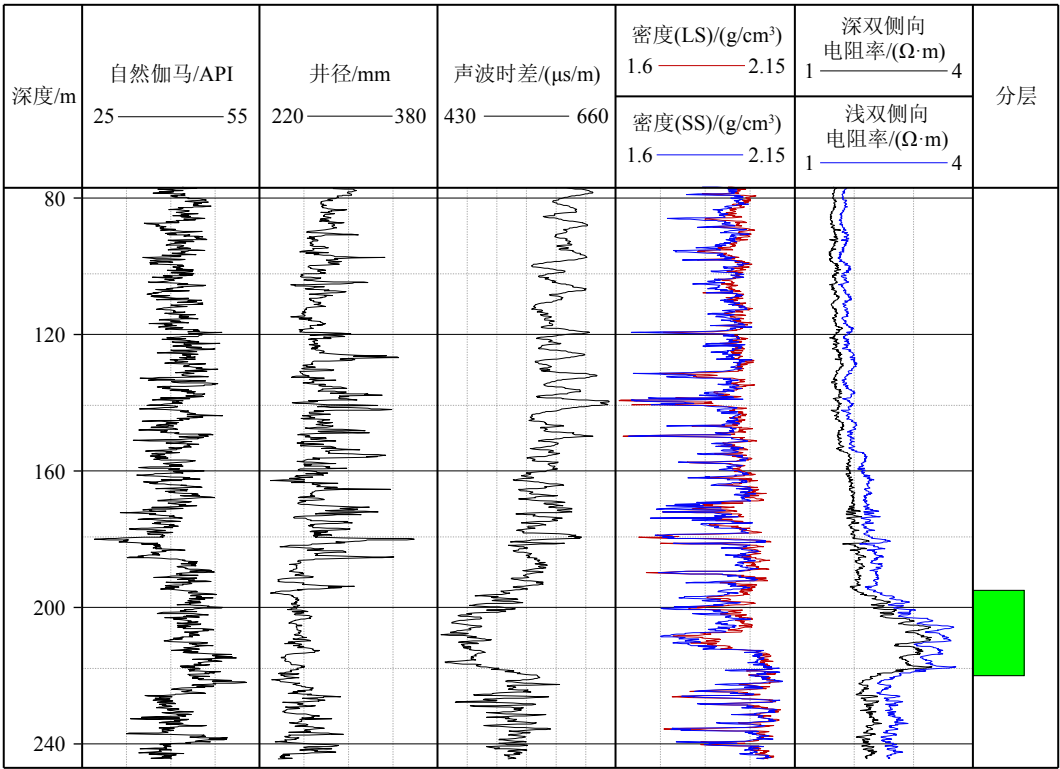


图 7 SH2 站位测井曲线

绿色层段表示水合物地层。

Fig.7 Well logging data of SH2 site

The green section represents hydrate-bearing sediments.

2007 年在神狐海域共实施了 8 个天然气水合物钻探站位, 其中 SH2、SH3 和 SH7 站位钻遇了水合物样品。其中 SH2 站位水合物厚度约 25 m, 位于海底以下 195~220 m, 平均饱和度 25%^[49], 最高值达 48%, 部分测井曲线如图 7 所示。

针对本研究区内的 SH2 站位, 使用上述建模方法计算站位处的弹性参数。硬币状孔隙和椭球形

孔隙各自的纵横比根据实测纵波速度反演求得。计算得到的纵横波速度以及剪切模量如图 8 所示。计算的纵波速度和与实测纵波速度有较好的一致性, 两者相关系数为 0.824, 方差为 0.0182, 绝对误差平均值为 48.49 m/s。对计算得到的弹性参数进行交会分析(图 9), 实测纵波速度和自然伽马对水合物含量的区分能力有限, 而剪切模量对于水合

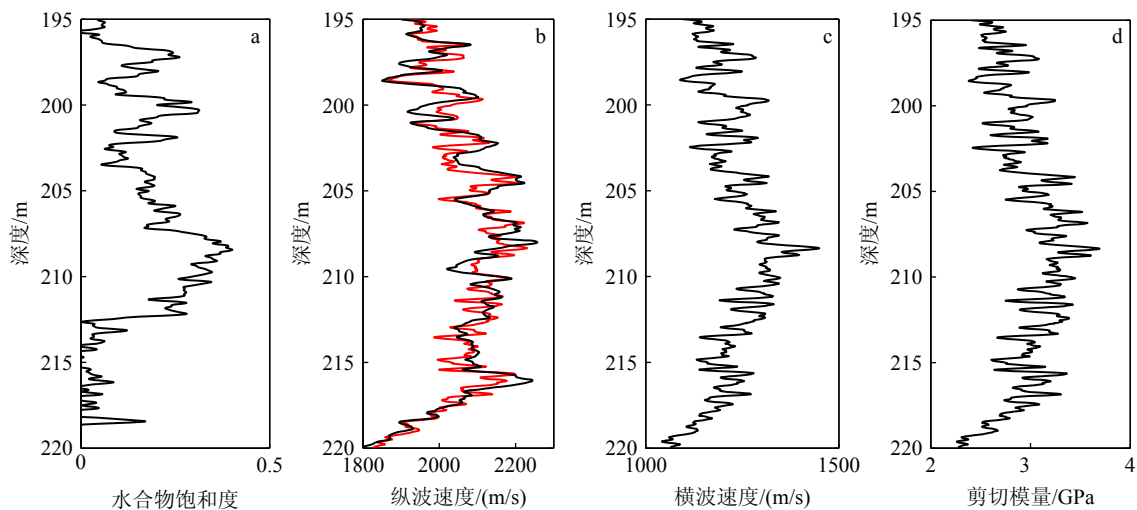


图 8 SH2 站位水合物地层的水合物饱和度及弹性参数计算结果

a: 根据实测电阻率曲线计算的水合物饱和度, b: 纵波速度 (红色曲线表示实测值, 黑色曲线表示计算值), c: 横波速度计算值; d: 剪切模量计算值。

Fig.8 Calculation results of hydrate saturation and elastic parameters of hydrate strata at SH2 site

a: hydrate saturation calculated according to the measured resistivity, b: P-wave velocity (red curve represents the measured value, black curve represents the calculated value), c: calculated shear wave velocity; d: calculated shear modulus.

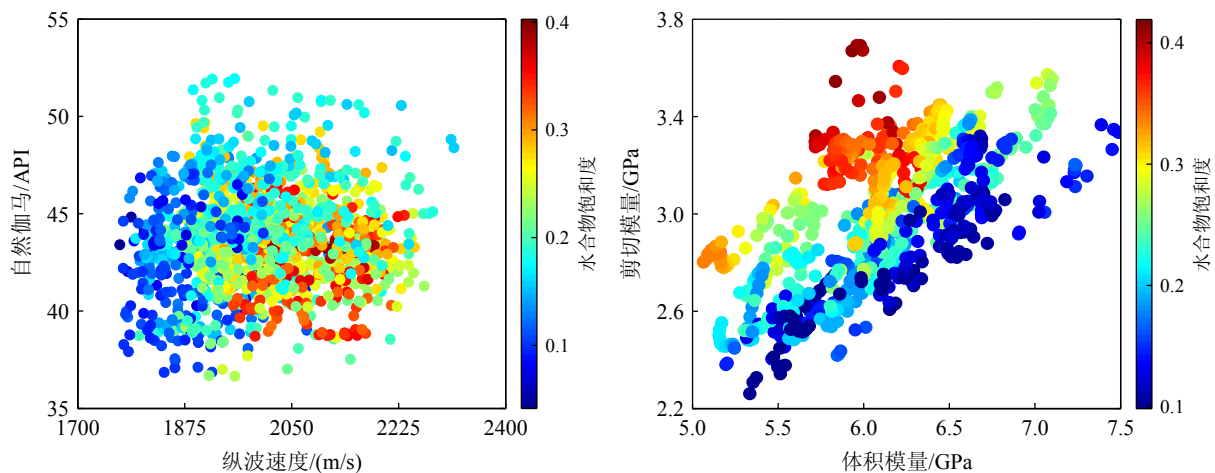


图 9 SH2 站位水合物地层弹性参数交会图

a: 实测纵波速度和实测自然伽马交会图, b: 计算的体积模量和剪切模量交会图。

Fig.9 Crossplots of elastic parameters of hydrate-bearing sediments at SH2 site

a: Crossplot of measured P-wave velocity and measured Gamma, b: crossplot of calculated bulk modulus and shear modulus.

物含量有较好的指示作用, 较高水合物饱和度的地层对应着较高的剪切模量。

3 叠前地震反演

关于纵波模量和剪切模量的弹性阻抗方程, 其标准化形式为^[50]:

$$EI(\theta) = (M_0 \rho_0)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M}{M_0} \right)^{a(\theta)} \left(\frac{\mu}{\mu_0} \right)^{b(\theta)} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{c(\theta)} \quad (9)$$

其中, EI 为弹性阻抗, M 和 μ 分别为饱和岩石的纵波模量和剪切模量(横波模量), $a = \frac{1}{2} \sec^2 \theta$, $b = -4\gamma^2 \sin^2 \theta$, $c = 1 - \frac{1}{2} \sec^2 \theta$, θ 为入射角。

结合岩石物理框架下弹性参数的计算结果, 从测井资料以及地震资料出发, 利用弹性阻抗贝叶斯反演方法计算得到弹性阻抗, 然后使用上式进行纵横波模量的直接提取。该方法不需要先提取纵横波速度及密度信息, 因此避免了从弹性阻抗计算纵横波速度再计算剪切模量过程中的累积误差。

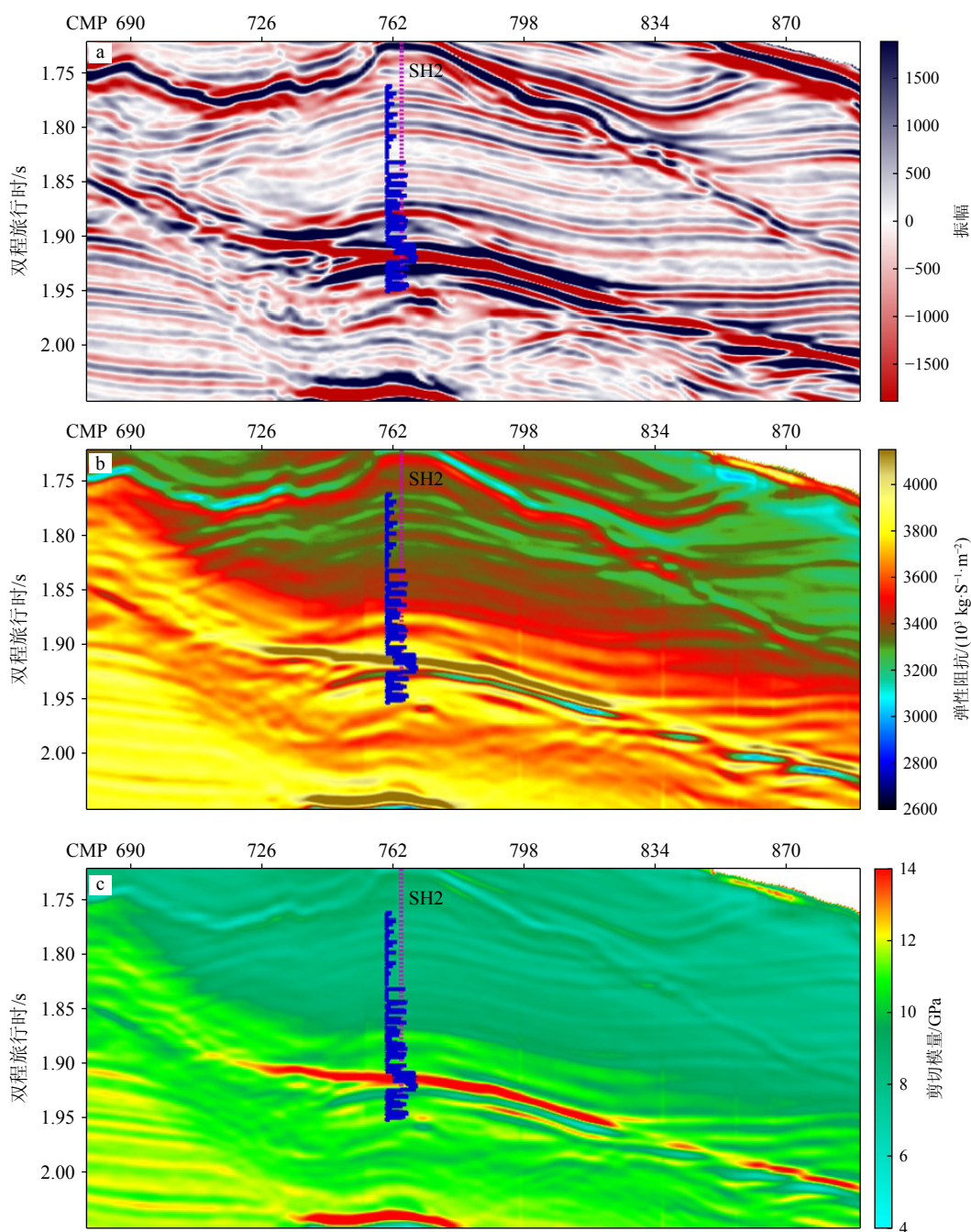


图 10 SH2 站位水合物地层弹性参数交会图

蓝色曲线为 SH2 井的实测纵波速度曲线。a: 中角度叠加地震剖面, 中心角度为 20° ; b: 中角度弹性阻抗剖面, 中心角度为 20° ; c: 反演得到的剪切模量剖面。

Fig.10 Seismic, elastic impedance, and inverted shear modulus profiles of SH2 site

The blue curve is the measured P-wave velocity of SH2 site. a: Partial stack seismic profile at centric angle of 20° ; b: elastic impedance profile at centric angle of 20° ; c: inverted shear modulus profile.

弹性阻抗贝叶斯反演得到的弹性阻抗体以及直接反演得到的水合物地层剪切模量如图 10 所示。反演结果整体横向连续性较好, 水合物地层分属高剪切模量数值区间, 与岩石物理交会分析的认识相吻合; 测井纵波速度增大的位置与剪切模量较高的位置匹配较好, 反演结果与 SH2 井的实际测井

钻遇结果保持较高一致性, 验证了本工区使用剪切模量直接反演方法进行水合物识别的可靠性。

4 结论

(1) 考虑神狐海域天然气水合物的微观结构特

征, 基于测井数据和地震数据, 使用岩石物理建模以及叠前贝叶斯地震反演方法, 从叠前地震数据中提取水合物地层的剪切模量参数, 与 SH2 站位测井钻遇结果保持较高一致性, 验证了使用剪切模量反演方法进行水合物识别的可靠性和有效性。

(2) 在岩石物理建模过程中, 对于水合物地层的微观结构, 本文主要是通过矿物组分、孔隙结构以及水合物和矿物颗粒的接触关系来描述。实际水合物地层的微观结构随沉积环境以及富集条件的变化而差别非常大, 因此等效岩石物理模型所用的一些物性参数, 比如孔隙形状以及各类孔隙的孔隙度, 都是对实际地层微观结构的等效近似。针对水合物地层的矿物组分以及水合物在地层中的赋存状态, 许多学者通过 CT 图像以及实验等途径, 给出了具体的描述和大量的数据, 这些都是本文进行岩石物理建模的依据。

(3) 本文的方法适用于孔隙充填型水合物地层, 为该水合物地层的识别和预测提供了一种新的思路和可靠的方法。但是海域水合物的赋存状态多样, 包括颗粒支撑型、裂缝充填型等, 不同类型的水合物需要通过岩石物理建模和交会分析等方法查明弹性参数对水合物含量的敏感性, 确定敏感弹性参数, 再使用地震反演方法进行敏感弹性参数的提取。

参考文献 (References)

- [1] Miller J J, Lee M W, von Huene R. An analysis of a seismic reflection from the base of a gas hydrate zone, offshore Peru[J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(5): 910-924.
- [2] 宋海斌, 吴时国, 江为为. 南海东北部 973 剖面 BSR 及其热流特征[J]. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1508-1517. [SONG Haibin, WU Shiguo, JIANG Weiwei. The characteristics of BSRs and their derived heat flow on the profile 973 in the northeastern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(5): 1508-1517.]
- [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] 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 Shenhu area on the northern slope of the South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 1-14.]
- [5] 梁劲, 王静丽, 杨承志, 等. 珠江口盆地东部海域含天然气水合物沉积层的地球物理特征[J]. 天然气工业, 2017, 37(2): 126-133. [LI-ANG Jin, WANG Jingli, YANG Chengzhi, et al. Geophysical characteristics of gas hydrate bearing sediments in the eastern sea area of the Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(2): 126-133.]
- [6] 张伟, 梁金强, 苏丕波, 等. 南海北部陆坡高饱和度天然气水合物气源运聚通道控藏作用[J]. 中国地质, 2018, 45(1): 1-14. [ZHANG Wei, LIANG Jinqiang, SU Pibo, et al. Migrating pathways of hydrocarbons and their controlling effects associated with high saturation gas hydrate in Shenhu area, northern South China Sea[J]. Geology in China, 2018, 45(1): 1-14.]
- [7] Wang X J, Collett T S, Lee M W, et al. Geological controls on the occurrence of gas hydrate from core, downhole log, and seismic data in the Shenhu Area, South China Sea[J]. Marine Geology, 2014, 357: 272-292.
- [8] 刘昌岭, 孙运宝. 海洋天然气水合物储层特性及其资源量评价方法[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(5): 44-57. [LIU Changling, SUN Yunbao. Characteristics of marine gas hydrate reservoir and its resource evaluation methods[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, 41(5): 44-57.]
- [9] Dvorkin J, Nur A. Elasticity of high-porosity sandstones: theory for two North Sea data sets[J]. Geophysics, 1996, 61(5): 1363-1370.
- [10] Ecker C, Dvorkin J, Nur A. Sediments with gas hydrates: internal structure from seismic AVO[J]. Geophysics, 1998, 63(5): 1659-1669.
- [11] Helgerud M B, Dvorkin J, Nur A, et al. Elastic-wave velocity in marine sediments with gas hydrates: effective medium modeling[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(13): 2021-2024.
- [12] Ecker C, Dvorkin J, Nur A M. Estimating the amount of gas hydrate and free gas from marine seismic data[J]. Geophysics, 2000, 65(2): 565-573.
- [13] Lee M W, Collett T S. Pore-and fracture-filling gas hydrate reservoirs in the Gulf of Mexico Gas Hydrate Joint Industry Project Leg II Green Canyon 955 H well[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 34(1): 62-71.
- [14] Qian J, Wang X J, Collett T S, et al. Gas hydrate accumulation and saturations estimated from effective medium theory in the eastern Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. Interpretation, 2017, 5(3): SM33-SM48.
- [15] Terry D A, Knapp C C. A unified effective medium model for gas hydrates in sediments[J]. Geophysics, 2018, 83(6): MR317-MR332.
- [16] Winters W J, Waite W F, Mason D H, et al. Methane gas hydrate effect on sediment acoustic and strength properties[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 56(1-3): 127-135.
- [17] Mallick S, Huang X R, Lauve J, et al. Hybrid seismic inversion: a reconnaissance tool for deepwater exploration[J]. The Leading Edge, 2000, 19(11): 1230-1237.
- [18] Lu S M, McMechan G A. Estimation of gas hydrate and free gas saturation, concentration, and distribution from seismic data[J]. Geophysics, 2002, 67(2): 582-593.
- [19] 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.

- [20] Wang X J, Wu S G, Xu N, et al. Estimation of gas hydrate saturation using constrained sparse spike inversion: case study from the Northern South China Sea[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2006, 17(4): 799-813.
- [21] 王秀娟, 吴时国, 余鹏, 等. 混合地震反演技术及其在水合物勘探中的应用[J]. *石油物探*, 2007, 46(3): 278-282, 301. [WANG Xiujuan, WU Shiguo, YU Peng, et al. Hybrid seismic inversion and its application in hydrate exploration[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2007, 46(3): 278-282, 301.]
- [22] 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 Shenhu Area, Northern South China Sea[J]. *Geoscience*, 2010, 24(3): 495-500.]
- [23] Wang X J, Wu S G, Guo Y Q, et al. Geophysical indicators of gas hydrate in the Northern Continental Margin, South China Sea[J]. *Journal of Geological Research*, 2011, 2011: 359597.
- [24] Chen M A P, Riedel M, Hyndman R D, et al. AVO inversion of BSRs in marine gas hydrate studies[J]. *Geophysics*, 2007, 72(2): C31-C43.
- [25] Zhang R W, Li H Q, Zhang B J, et al. Detection of gas hydrate sediments using prestack seismic AVA inversion[J]. *Applied Geophysics*, 2015, 12(3): 453-464.
- [26] Liu T, Liu X W. Identification of morphologies of gas hydrate distribution based on amplitude variation with angle analysis[J]. *Geophysics*, 2018, 83(3): B143-B154.
- [27] 刘斌, 张衡. 海底水合物 OBS 数据全波形反演数值例子[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(1): 379-384. [LIU Bin, ZHANG Heng. Full waveform inversion of OBS data from ocean gas hydrate: synthetic example[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(1): 379-384.]
- [28] 霍元媛, 杨睿, 潘纪顺, 等. 波形反演在天然气水合物中的应用研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(4): 207-221. [HUO Yuanyuan, YANG Rui, PAN Jishun, et al. Application of full waveform inversion to gas hydrate research[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(4): 207-221.]
- [29] Holbrook W S, Hoskins H, Wood W T, et al. Methane hydrate and free gas on the Blake Ridge from vertical seismic profiling[J]. *Science*, 1996, 273(5283): 1840-1843.
- [30] 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. [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.]
- [31] 印兴耀, 宗兆云, 吴国忱. 岩石物理驱动下地震流体识别研究[J]. *中国科学(地球科学)*, 2015, 45(1): 8-21. [YIN Xingyao, ZONG Zhaoyun, WU Guochen. Research on seismic fluid identification driven by rock physics[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(2): 159-171.]
- [32] 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 Shenhu Area, Northern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(6): 1641-1650.]
- [33] 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 Shenhu Area, South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(7): 1691-1698.]
- [34] 吴能友, 张海啟, 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 Shenhu Area, North Slope of South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(9): 1-6.]
- [35] 陆红锋, 陈弘, 陈芳, 等. 南海神狐海域天然气水合物钻井沉积物矿物学特征[J]. *南海地质研究*, 2009, 20: 28-39. [LU Hongfeng, CHEN Hong, CHEN Fang, et al. Mineralogy of the sediments from gas-hydrate drilling sites, Shenhu Area, South China Sea[J]. *Geological Research of South China Sea*, 2009, 20: 28-39.]
- [36] Wang X J, Hutchinson D R, Wu S G, et al. Elevated gas hydrate saturation within silt and silty clay sediments in the Shenhu area, South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B5): B05102.
- [37] Schultheiss P, Holland M, Humphrey G. Wireline coring and analysis under pressure: recent use and future developments of the HY-ACINTH system[J]. *Scientific Drilling*, 2009, 7: 44-50.
- [38] 李承峰, 叶旺全, 陈亮, 等. 南海神狐海域天然气水合物微观赋存特征的超分辨率 CT 图像识别[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2024, 44(3): 149-159. [LI Chengfeng, YE Wangquan, CHEN Liang, et al. Super-resolution CT image recognition of micro-occurrence characteristics of natural gas hydrates from Shenhu area in northern South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2024, 44(3): 149-159.]
- [39] Lee M W, Waite W F. Estimating pore-space gas hydrate saturations from well log acoustic data[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(7): Q07008.
- [40] Guerin G, Goldberg D, Meltser A. Characterization of in situ elastic properties of gas hydrate-bearing sediments on the Blake Ridge[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104(B8): 17781-17795.
- [41] 刘昌岭, 业渝光, 孟庆国, 等. 南海神狐海域天然气水合物样品的基本特征[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(5): 1-5. [LIU Changling, YE Yuguang, MENG Qingguo, et al. Characteristics of gas hydrate samples recovered from Shenhu Area in the South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(5): 1-5.]
- [42] 胡高伟, 李承峰, 业渝光, 等. 沉积物孔隙空间天然气水合物微观分布观测[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(5): 1675-1682. [HU Gaowei, LI Chengfeng, YE Yuguang, et al. Observation of gas hydrate distribution in sediment pore space[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(5): 1675-1682.]
- [43] Berryman J G. Mixture theories for rock properties[M]//Ahrens T J. *Rock Physics & Phase Relations: A Handbook of Physical Constants*. Washington: American Geophysical Union, 1995: 205-228.
- [44] 印兴耀, 化世榜, 宗兆云. 基于线性近似的微分等效介质方程解耦方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(2): 281-287. [YIN Xingyao, HUA Shibang, ZONG Zhaoyun. A decoupling approach for differen-

- tial equivalent equations based on linear approximation[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(2): 281-287.]
- [45] Xu S Y, White R E. A new velocity model for clay-sand mixtures[J]. *Geophysical Prospecting*, 1995, 43(1): 91-118.
- [46] Ciz R, Shapiro S A. Generalization of Gassmann equations for porous media saturated with a solid material[J]. *Geophysics*, 2007, 72(6): A75-A79.
- [47] Hill R. Elastic properties of reinforced solids: some theoretical principles[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1963, 11(5): 357-372.
- [48] Reuss A. Calculation of the flow limits of mixed crystals on the basis of the plasticity of monocrystals[J]. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1929, 9(1): 49-58.
- [49] 杨晓璐, 钟思玲, 万志峰. 泥底辟/泥火山流体热效应及其对天然气水合物赋存的影响 [J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(7): 15-23. [YANG Xiaolu, ZHONG Siling, WAN Zhifeng. The thermodynamics of mud diapir/volcano fluid and its influence on gas hydrate occurrence[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2018, 34(7): 15-23.]
- [50] 宗兆云, 印兴耀, 吴国忱. 基于叠前地震纵横波模量直接反演的流体检测方法 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55(1): 284-292. [ZONG Zhaoyun, YIN Xingyao, WU Guochen. Fluid identification method based on compressional and shear modulus direct inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(1): 284-292.]