

doi: 10.11720/wtyht.2019.0019

沙志彬, 万晓明, 赵忠泉, 等. 叠前同时反演技术在珠江口盆地西部海域天然气水合物储层预测中的应用[J]. 物探与化探, 2019, 43(3): 476-485. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0019>

Sha Z B, Wan X M, Zhao Z Q, et al. The application of pre-stack simultaneous inversion to gas hydrates reservoir prediction in the western Pearl River Mouth basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(3): 476-485. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0019>

叠前同时反演技术在珠江口盆地西部海域 天然气水合物储层预测中的应用

沙志彬^{1,2}, 万晓明², 赵忠泉², 梁金强², 杨瑞召³, 白钰⁴, 柴祎²

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430074; 2. 广州海洋地质调查局, 广东广州 510075; 3. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 4. 北京宇博新创地球物理技术有限公司, 北京 102200)

摘要: 珠江口盆地西部海域发育弱 BSR 或无 BSR 的天然气水合物储层, 常规叠后反演所获得的参数单一, 难以精确预测其天然气水合物分布特征。本文在震道集优化处理、精细速度分析、岩石物理分析及低频模型精确建立的基础上, 针对性地采用叠前同时反演技术, 对珠江口盆地西部海域天然气水合物储层进行预测, 并利用岩相流体概率分析技术对其进行综合识别, 实现了对天然气水合物储层地精细刻画。反演预测结果表明, 研究区天然气水合物较为发育, 预测结果与钻探结果吻合程度较高, 应用效果良好。

关键词: 天然气水合物; 叠前同时反演; 储层预测; 岩相流体概率分析技术; 珠江口盆地西部海域

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2019)03-0476-10

0 引言

天然气水合物(以下简称“水合物”)广泛分布于大陆边缘海底沉积物和陆地冻土带中, 据估算全球水合物储量巨大, 是未来理想的、清洁的可替代能源^[1-3]。我国南海北部陆坡是水合物形成发育的有利地区, 其水合物资源丰富^[4-6]。钻探证实, 通常情况下水合物储层具有似海底反射(bottom simulating reflector, 简称 BSR)、空白反射等地震响应特征, 发育于 BSR 上覆地层中, 具有较高纵波速度。因此, 前人研究尝试采用多地震属性分析、聚类分析、速度分析等地球物理手段综合识别海域水合物, AVO (amplitude versus offset) 分析、地震反演等技术也被广泛应用于水合物储层的预测当中^[7-18]。然而, 研究证实水合物与 BSR 并不存在一一对应关系, 与地震振幅、速度亦不存在严格的对应关系。研究表明,

仅通过特定的地震响应特征去识别水合物仍存在诸多不足, 如通过地震上 BSR 及地震属性等反射特征难以预测含水合物地层的厚度、孔隙度及饱和度等信息^[19-20]。研究区位于南海北部陆坡珠江口盆地西部海域, 海底较为平坦, BSR 地震特征真假难辨, 且可能存在弱 BSR 或无 BSR 的水合物发育区, 水合物识别难度较大, 常规地震属性分析及叠后反演方法具有一定的局限性, 存在对水合物储层识别的误判或漏判现象。针对研究区地质及地球物理特征, 本文以优化处理后的地震数据为基础, 进行精细速度分析及水合物储层岩石物理分析, 通过叠前同时反演技术获得含水合物地层精确的纵波阻抗、横波阻抗及纵横波速度比等参数, 在此基础上, 利用岩相流体概率分析技术对研究区水合物储层开展综合识别分析, 有效减小了水合物识别的多解性, 获得了可靠的预测结果。

收稿日期: 2019-01-12; 修回日期: 2019-04-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0310000); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160211)

作者简介: 沙志彬(1972-), 男, 广东梅州人, 硕士, 教授级高工, 长期从事天然气水合物勘查与研究。Email: shazb2008@hydz.cn

1 区域地质概况

研究区位于南海北部陆坡珠江口盆地西部海域,研究区属于新生代被动大陆边缘盆地,呈北东向展布,新生代沉积层厚度大^[21],第四系与第三系上新统发育海相泥岩,且第三系煤系地层普遍处于异常高压、高温条件,分别有利于形成生物成因和热成因天然气,能够为水合物的形成提供充足的气源基础^[3]。研究区断裂较为发育,同时还发育有泥底辟和气烟囱。地震资料显示断裂带与泥底辟、气烟囱连通,且向上可延伸至海底附近,是气体运移的有利通道。因此,研究区是水合物成藏的有利场

所^[21-26]。同时,研究区海底较为平坦,其地震剖面显示(图 1),从海底至 2.2 ms 深度范围内可以观测到大量的强反射地震特征,大多数连续性较好,具有负极性的特征。但是研究区沉积地层与海底平行,地震强反射界面与沉积地层无明显斜交特征,且强反射界面之上无明显的空白反射。因此,难以判断强反射界面是否是 BSR。根据精细速度分析结果判断,部分强反射界面附近存在异常高速层或是速度倒转现象,初步确定是由水合物赋存引起,存在速度异常的强反射界面是指示水合物存在的非典型 BSR 反射特征。类似的速度异常特征还存在于弱地震反射界面附近,研究认为其可能是弱 BSR 或无 BSR 的水合物沉积层底界。

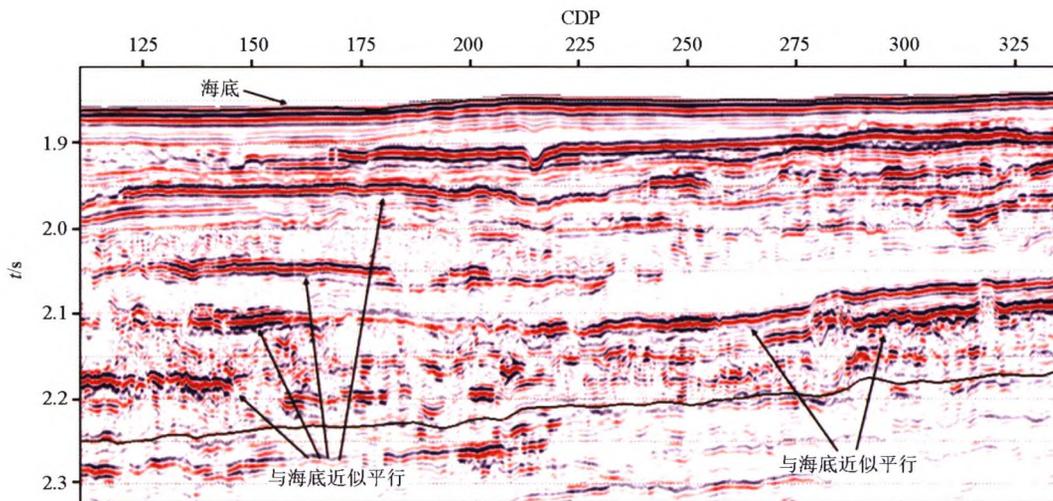


图 1 研究区地震剖面
Fig.1 Seismic section of the study area

2 关键技术

叠前同时反演的优劣取决于关键环节的质量控制和关键技术参数的合理选择。结合研究区水合物储层弱 BSR 或无 BSR 等地震反射及速度异常特征,在叠前同时反演过程中,针对性采用了地震道集数据的优化处理、精细速度场建立、岩石物理分析、低频模型建立和水合物综合识别技术等。针对研究区天然气水合物储层预测的叠前同时反演流程如图 2 所示。

2.1 道集优化及叠加处理

2.1.1 道集优化处理

研究区地震 CRP 道集采样率 1ms,时间范围 1.3 ~ 5.0 s,最小偏移距 134 m,最大偏移距 2 506 m,最大覆盖次数为 96 次。原始 CRP 道集质量较好,但仍

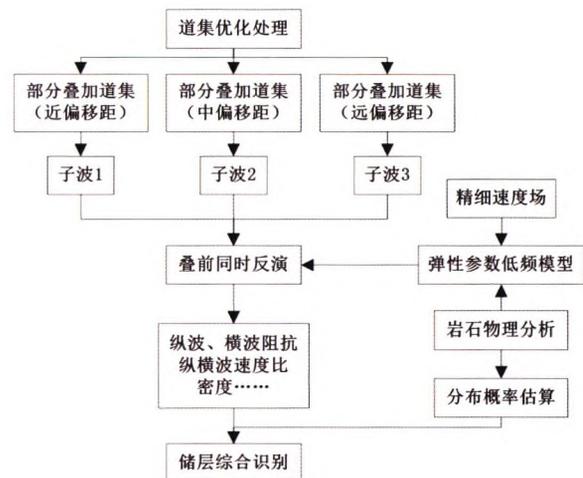


图 2 叠前同时反演流程
Fig.2 Pre-stack simultaneous inversion process

存在随机噪声及残余动校问题,且远道上存在信息畸变(图 3)。因此,在道集叠加前,有必要对其进行

残余动校优化处理,并对多次波等随机噪声进行压制。需要指出的是,远道集信息畸变会导致道集在远道和近道无法对齐,对后期研究影响较大。由于入射临界角限制,在实际处理中解决拉伸畸变的直接办法就是在动校前对原始道集进行外切,以保证

数据质量。道集优化前后叠加对比显示,动校正前,远道的信息发生畸变,近道集和远道集无法对齐,“下拉”现象严重。动校正、外切及随机噪声衰减等优化处理后,道集拉平,道集数据质量明显提高。

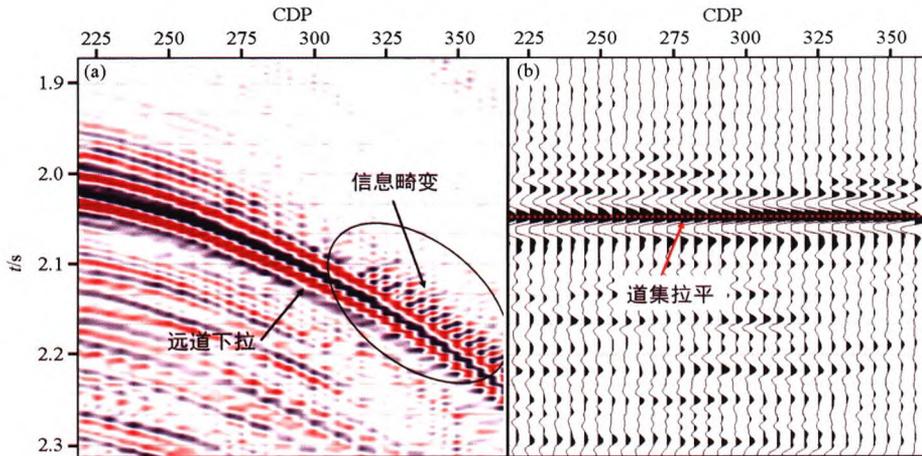


图 3 道集优化前(a)后(b)对比

Fig.3 Comparison of the seismic gathers before(a) and after(b) optimization

2.1.2 道集叠加处理

关于叠前同时反演所需的部分叠加数据质控主要涉及两个方面问题:①使用角度道集还是偏移距道集进行部分叠加;②叠加方案怎么确定及用于反演的分叠加数据体个数。分角度叠加与分偏移距叠加各有优劣。如果使用角度道集,反演过程中将失去对速度体的控制,若速度存在问题,那么角度道集也会有问题,所得到的部分叠加数据及反演结果固然存在问题。偏移距道集不存在以上问题,但针对研究区而言,其浅层覆盖次数少,若分偏移距叠加数据体个数较多,会导致远偏移距的叠加数据体缺失浅层数据,其远道部分叠加数据将无法对浅层水合物进行预测研究。

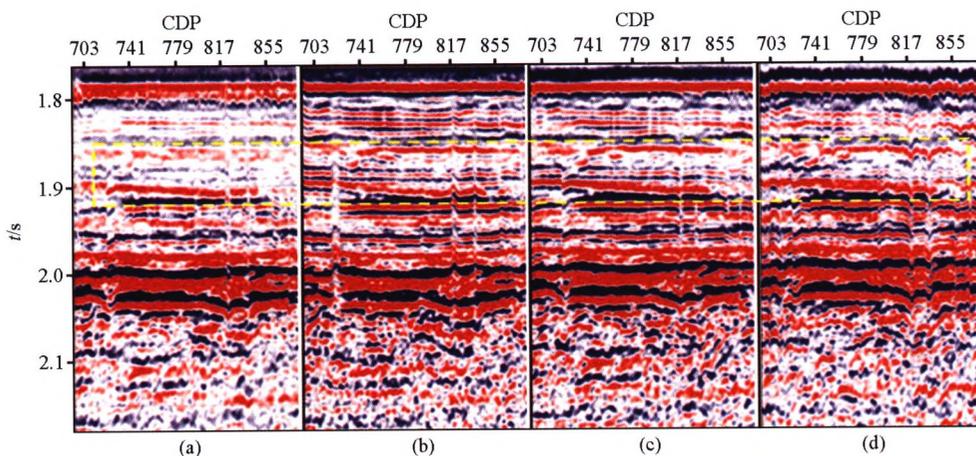
高品质分道集叠加地震数据是获得稳定可信的叠前同时反演结果的关键,且高品质分道集叠加数据个数越多,其反演结果越稳定可信。结合优化后道集信噪比与远道畸变外切的情况,为保证每一个部分叠加数据体至少 7 次以上的覆盖次数,确保部分叠加数据具有较高信噪比和良好资料品质。同时,可以满足浅层水合物的预测研究,研究区采取了三个分偏移距道集叠加的方案,以保证每一部分分叠加数据都有足够的覆盖次数以提高处理成果数据的信噪比。图 4~图 5 叠加结果显示,全叠加数据与分叠加数据地震反射特征一致,在黄色虚线范围内存在地震反射随偏移距增加逐渐增强的现象,AVO 现象较为明显。同时,分叠加数据主频在 70 Hz,频

带范围在 20~120 Hz,全叠加、近道、中道分叠加数据均有较高的主频与信噪比,远道分叠加数据主频与信噪比略有降低,但整体上,能较好满足叠前同时反演的需要。

2.2 精确速度场建立

精细纵波速度分析有利于识别含水合物层与下伏地层的速度差异^[23]。针对研究区地震资料特点,首先在优化后道集上采用高密度双谱速度分析方法,该方法充分考虑了地下介质的各向异性,利用零偏移距走时和最大偏移距剩余时差来描述各向异性时移校正。在一定约束条件下自动拾取,得到精度较高的叠加速度场^[23],并对其进行转换、质控及优化处理,获得反演所需的高精度纵波层速度模型。

研究中主要采用以下具有针对性处理技术。首先采用高密度双谱速度分析技术获取叠加速度谱,利用 Dix 方程进行层速度转换。利用散点交会法、低通滤波和空间平滑技术在空间范围内剔除异常速度点,使层速度更接近实际情况。一般情况下速度谱频率在 2 Hz 以内,针对研究区速度资料特征,低通滤波的高切频率为 2 Hz。最后,在优化处理基础上对层速度谱进行空间网格插值及平滑处理,以获得趋势平滑合理的精细层速度模型^[19]。最终的精细层速度剖面显示(图 6),海水速度信息得到体现,从海平面到深部地层垂向上速度变化自然,局部速度异常特征明显,整体变化趋势与地层特征相符,速度精度较高。

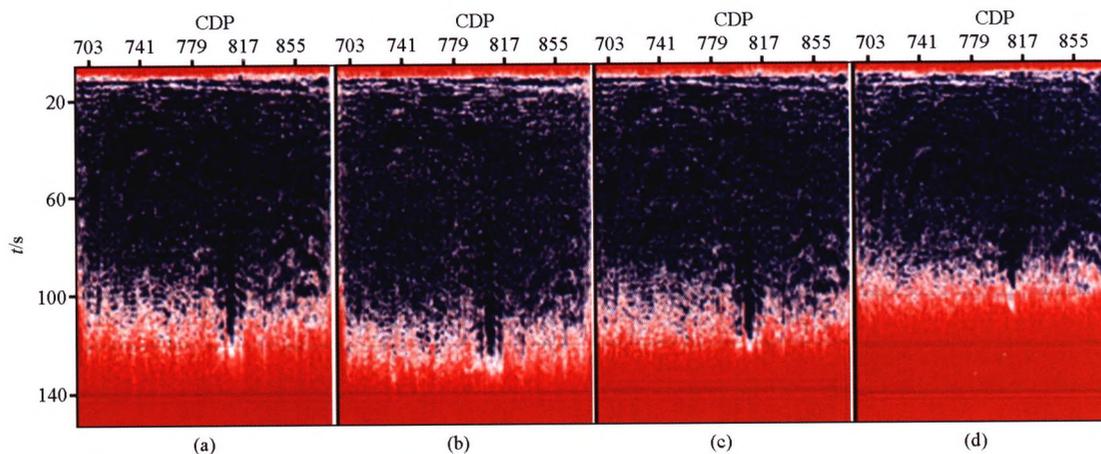


a—全叠加数据频谱;b—近道叠加数据频谱;c—中道叠加数据频谱;d—远道叠加数据频谱

a—The spectrum of full seismic gathers stacked data;b—The spectrum of near seismic gathers stacked data;c—The spectrum of medium seismic gathers stacked data;d—The spectrum of far seismic gathers stacked data

图 4 分道集叠加数据对比

Fig.4 Comparison of the offset seismic gathers stacked data



a—全叠加数据频谱;b—近道叠加数据频谱;c—中道叠加数据频谱;d—远道叠加数据频谱

a—The spectrum of full seismic gathers stacked data;b—The spectrum of near seismic gathers stacked data;c—The spectrum of medium seismic gathers stacked data;d—The spectrum of far seismic gathers stacked data

图 5 分道集叠加数据频谱

Fig.5 The spectrum of the offset seismic gathers stacked data

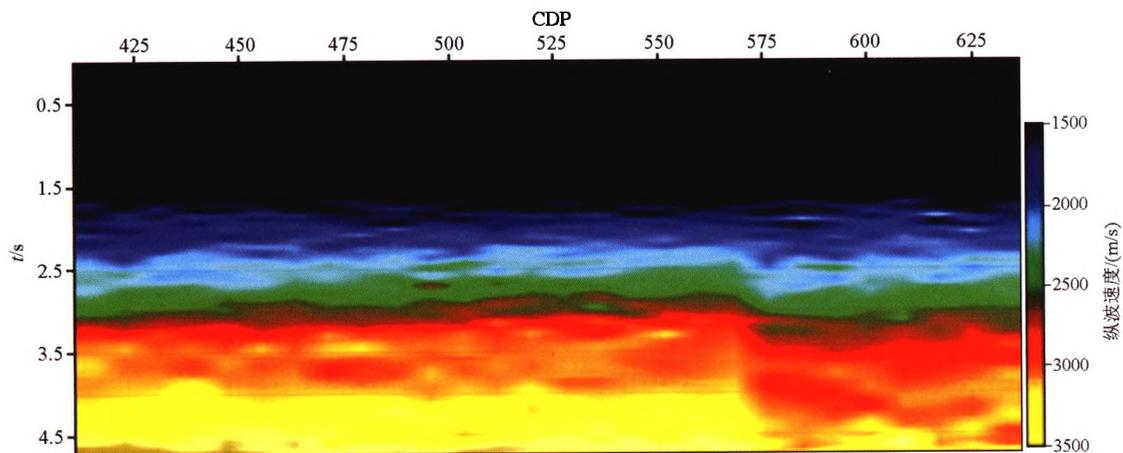


图 6 精细层速度剖面

Fig.6 Fine layer velocity section

2.3 含水合物储层岩石物理特征分析

岩石物理分析是储层反演预测的基础。选取与研究区最为邻近的两口钻井,其均在海底以下 150 m 附近钻获水合物。因此,以海底以下 0~200 m 为范围,利用声波时差所转化获得的速度等弹性参数及电阻率等测井数据进行交会分析,研究水合物的岩石物理特征,获得水合物储层不同弹性参数之间的关系,并确定水合物的识别标准。研究区利用纵

横波速度比与纵波阻抗交汇,获取水合物识别的依据,分析结果认为水合物具有高纵波阻抗和低纵横波速度比的特征,研究区水合物储层纵波阻抗阈值为 $4 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,纵横波速度比阈值为 2.7(图 7)。同时,纵波速度与纵波阻抗、纵波阻抗与横波阻抗等弹性参数的交汇分析可以建立适合于研究区不同弹性参数间的关系,为叠前同时反演所需的横波速度等低频模型的建立提供依据。

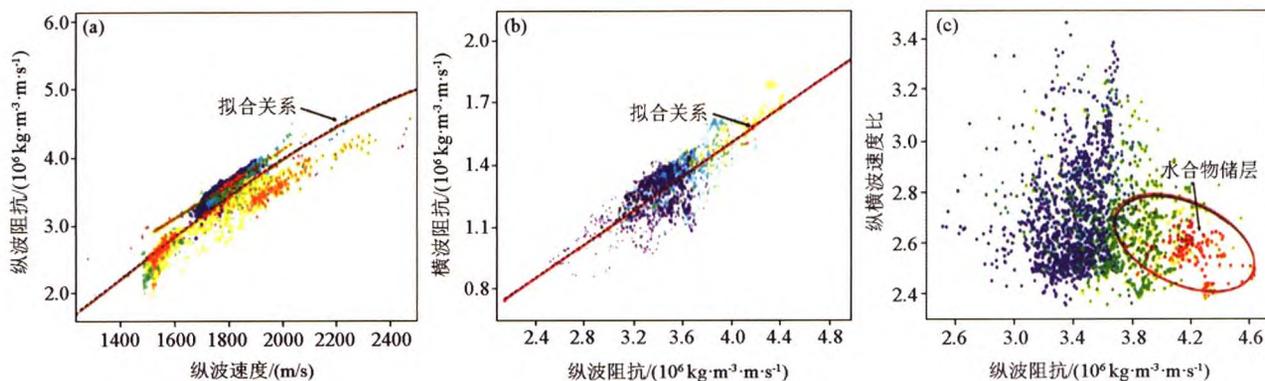


图 7 弹性参数交汇

Fig.7 Elastic parameter intersection diagram

2.4 低频模型的建立

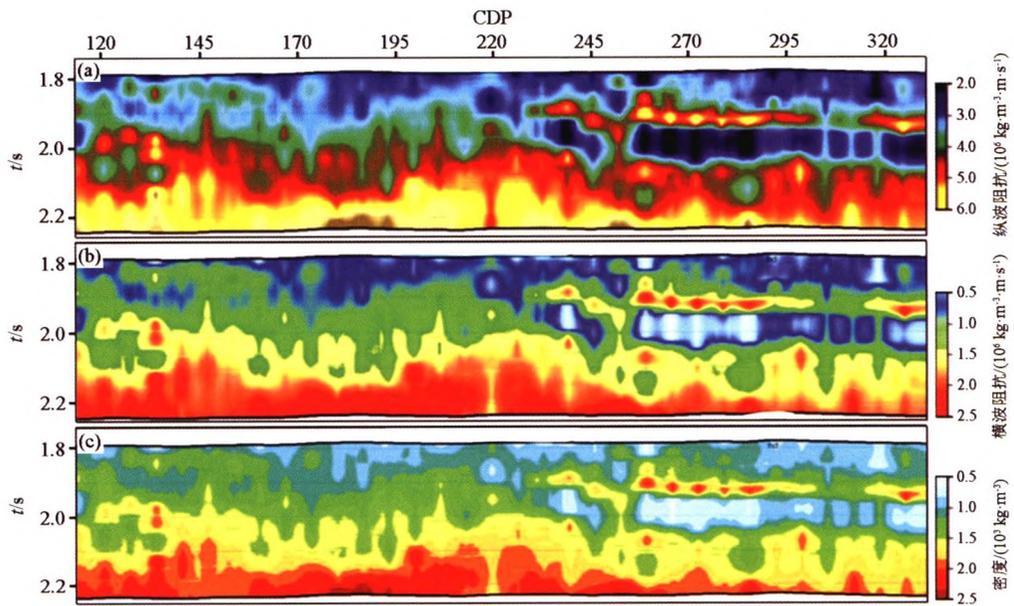
波阻抗反演依赖于地层层位划分与低频地质模型,而水合物分布不仅受沉积地层控制,还受温度压力的控制,分布较为分散,与地层层序并不完全一致。因此,利用地层解释的层位难以精确地建立符合实际水合物分布特征的地质模型^[8]。基于以上分析,可直接利用精细速度场所建立的低频模型,其不依赖于所解释的层序,也避免了测井数据沿地层趋势直接插值所导致的模型化问题^[8,17]。因此,利用纵波速度与纵波阻抗、横波阻抗、密度等弹性参数间的经验公式或是岩石物理分析获得的拟合公式,将高密度精细层速度模型转换成叠前同时反演所需的纵波阻抗、横波阻抗、密度等低频模型(图 8)。研究区地震资料缺少 10 Hz 以下频率成分,优化后的精细层速度模型频率为 2 Hz,因而转换后的纵波阻抗、横波阻抗、密度等低频模型均为 2 Hz,2~10 Hz 低频成分可通过反演算法获取,以获得宽频带的弹性参数反演数据体。

2.5 叠前同时反演

叠前同时反演根据选择的弹性参数配置,对不同偏移距叠加后的三个地震数据体同时进行反演,生成纵波阻抗、横波阻抗、纵横波速度比等反演数据体。除了道集质控与优化处理,精细速度场建立等上述关键环节外,在叠前反演过程中,还需优选适合

于研究区的重要反演参数,从而获得可靠的纵波阻抗、横波阻抗、纵横波速度比以及密度等反演结果。针对研究区的资料情况,对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、AVO 子波、频带补偿等。首先,基于全叠加子波提取各部分叠加体的 AVO 子波,并选择时窗长度为 400~800 ms 进行叠加数据体的子波估算,保证提取的每个 AVO 子波的幅度、相位关系清晰,近道和远道的能量关系匹配良好。其次,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 λ 、采样率等反演参数。

基于模型的叠前反演可将合成记录和地震记录的匹配程度作为质量控制的标准。研究区反演生成的合成记录与原始地震剖面吻合度较高,两者之间残差较小。因此,其反演结果的可信度较高。同时,可依据岩石物理分析确定的阈值对水合物进行识别,结果显示识别效果良好。如图 9 所示,在纵波阻抗和纵横波速度比剖面上都能较清楚地确定水合物的发育位置,且两种弹性参数对水合物储层识别效果基本一致。但是两种弹性参数在水合物厚度预测方面有所差异,较之纵波阻抗,利用纵横波速度比识别的水合物储层厚度普遍较小。因此,需要寻求更优的技术方法,充分利用不同弹性参数对水合物储层的敏感性进行综合识别。

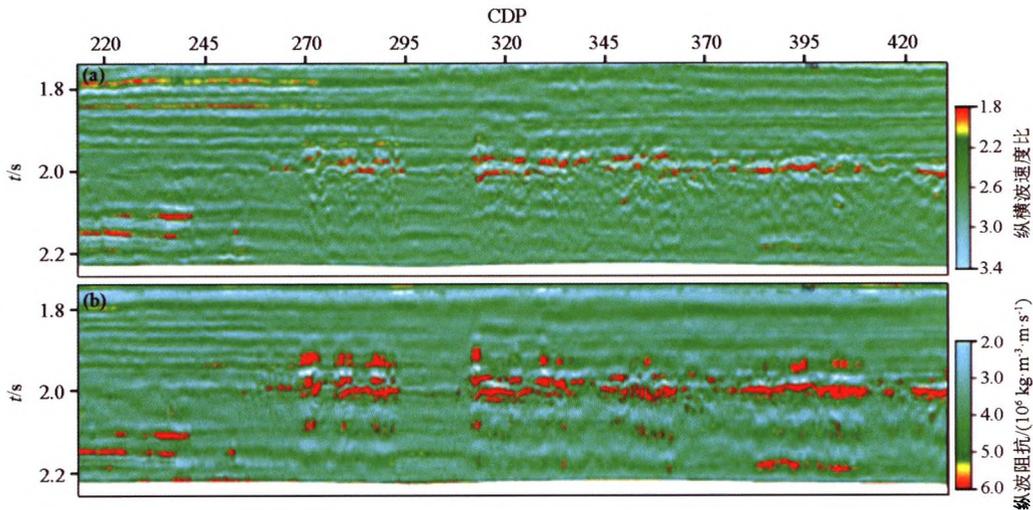


a—纵波阻抗低频模型; b—横波阻抗低频模型; c—密度低频模型

a—low frequency model of P-wave impedance; b—low frequency model of S-wave impedance; c—low frequency model of density

图 8 叠前弹性参数低频模型

Fig.8 Low frequency model of Pre-stack elastic parameters



a—纵横波速度比叠前反演剖面; b—纵波阻抗叠前反演剖面

a—pre-stack inversion section of P-wave velocity to S-wave velocity ratio; b—pre-stack inversion section of P-wave impedance

图 9 纵横波速度比与纵波阻抗叠前反演对比剖面

Fig.9 Pre-stack inversion contrast section of P-wave velocity to S-wave velocity ratio and P-wave impedance

2.6 水合物分布概率估算

岩相流体概率分析 (facies and fluid probabilities, FFP) 是应用地震反演结果进行岩性定量解释的工具, 是基于贝叶斯判别准则分析岩性与弹性参数之间的相互关系, 充分利用反演得到的弹性参数, 得到岩性概率体的工具。叠前同时反演得到了地震分辨率下的岩石弹性参数体, 如纵波阻抗、横波阻抗、纵横波速度比、泊松比等。这些数据体具有严格的岩石物理意义, 然而, 由于研究人员很难精确把握

这些参数的岩石物理意义, 也就很难得到合理的解释结果。鉴于此, 通过 FFP 工具定义概率密度函数 (PDF), 能够得到每一个岩性的概率体, 如泥岩概率体, 水合物概率体, 砂岩概率体, 所有岩性概率体相加为 1; 除此之外还能得到极大似然岩性体, 它代表某种岩性的概率最大。该技术可以综合利用多种反演弹性参数, 提高预测精度。

岩石物理分析表明, 研究区纵波阻抗和纵横波速度比可以有效识别水合物。因此, 以纵波阻抗与

纵横波速度比反演结果为基础,利用 FFP 技术对研究区水合物储层进行精确刻画。具体流程为首先利用纵波阻抗和纵横波速度比分别对水合物储层进行直方图分析,利用直方图分析结果绘制分布概率曲线,再进一步求取基于这两种弹性参数的水合物储层概率密度函数,最后以纵波阻抗和纵横波速度比反演数据为基础,利用概率密度函数联合计算出水合物储层分布概率体(图 10)。在此过程中最为关

键的参数是分布概率曲线的合理绘制,它直接关系到概率密度函数的正确求取,从而影响水合物储层分布概率体的计算精度。图 11 中水合物分布概率剖面对比显示,水合物储层分布特征与纵波阻抗(图 11a)、纵横波速度比分布特征相似(图 11b),而图 11c 则因为采用 FFP 技术充分综合了两者的有效信息,提高了水合物储层识别的可靠性,在储层厚度、分布形态等方面预测精度更高。

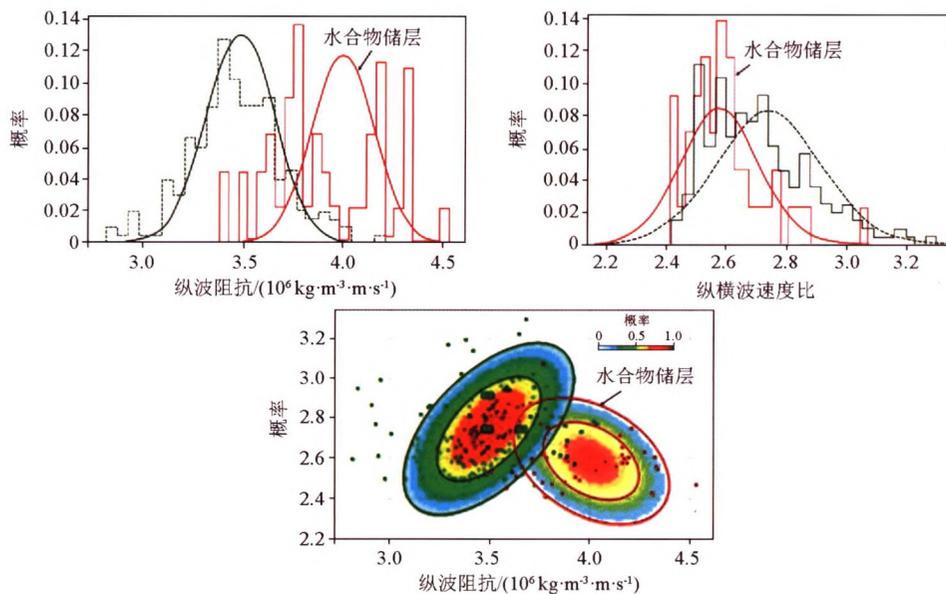
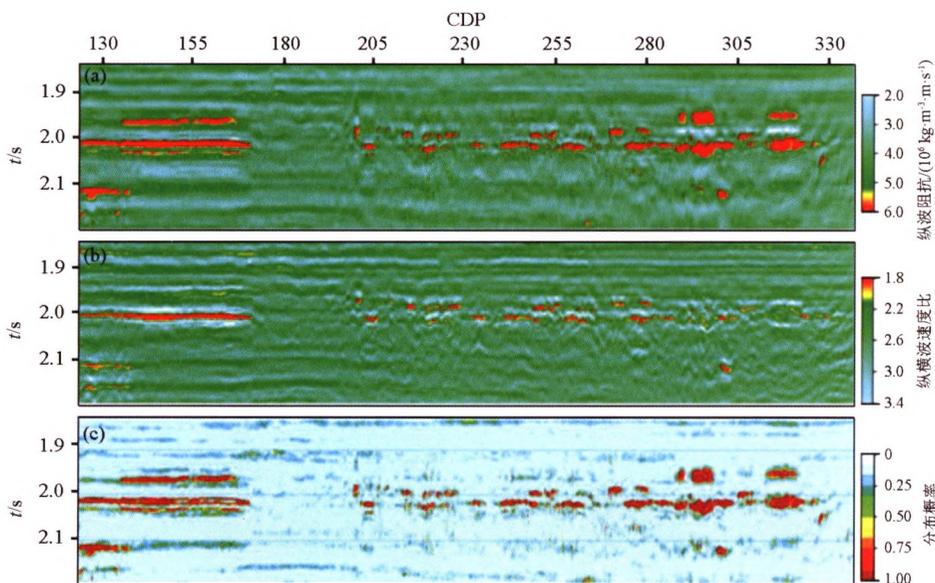


图 10 天然气水合物储层分布概率分析

Fig.10 Probability analysis of natural gas hydrate reservoir distribution



a—纵波阻抗叠前反演剖面;b—纵横波速度比叠前反演剖面;c—天然气水合物分布概率

a—pre-stack inversion section of P-wave impedance;b—pre-stack inversion section of P-wave velocity to S-wave velocity ratio;c—the section of gas hydrate distribution probability

图 11 天然气水合物分布概率对比剖面

Fig.11 The contrast section of gas hydrate distribution probability

3 反演效果分析

在岩相流体概率分析结果的基础上,以分布概率 0.5 为阈值识别水合物储层,在识别结果上求取时间厚度,最后利用速度资料进一步估算水合物储层厚度,获取其平面分布特征,为后续井位部署提高有力依据。预测结果显示,研究区水合物总体上发育良好,最大预测厚度可达 130 m 左右,在西部、

南部及西北部均成片发育,其中南部水合物平均厚度最大。对比最新钻探结果显示,在水合物预测有利区,于 W01、W02、W03 站位钻遇多层分布的水合物矿层,并获取了多类型、高纯度的水合物样品(图 12)。因此,叠前同时反演预测结果与实际钻探结果吻合程度较高,在一定程度上可认为叠前同时反演技术在无明显 BSR 或弱 BSR 水合物发育区应用效果良好。

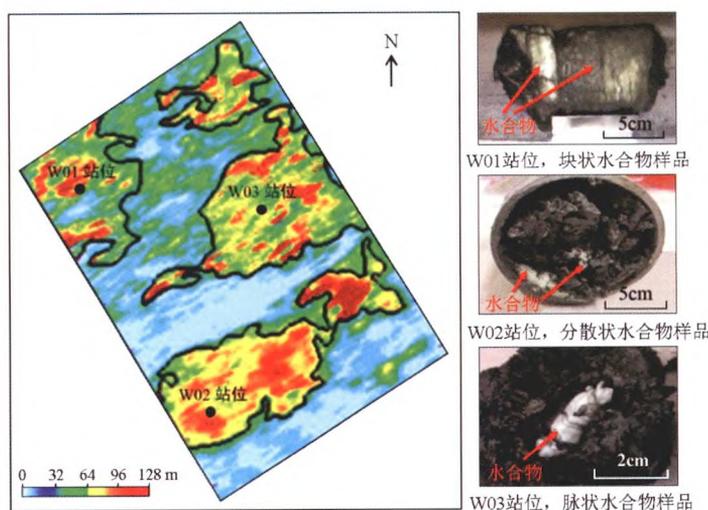


图 12 研究区天然气水合物储层分布平面图及钻探获取的样品

Fig.12 The map of gas hydrate reservoir distribution in the study area and samples obtained by drilling

4 结论

1) 残余动校正、随机噪声压制等技术手段对道集数据的优化处理以及合理叠加方案的选取,是获得高质量部分叠加地震资料的基础,精细速度场是建立准确低频模型的基础,两者均是获得可靠叠前同时反演结果的重要环节。

2) 岩石物理分析认为纵波阻抗及纵横波速度比均是水合物敏感弹性参数,研究区水合物具有高纵波阻抗、低纵横波速度比的特征,其纵波阻抗识别阈值为 $4 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,纵横波速度比阈值为 2.7。且岩石物理分析结果是水合物储层分布概率计算的依据,基于此,可综合识别水合物储层厚度及分布形态,并有效降低水合物储层预测的多解性,提高了水合物储层刻画的可信性及精度。

3) 研究区水合物分布范围广,垂向上呈多层发育,储层最大预测厚度可达 130 m。预测结果与钻探结果吻合程度较高,认为叠前同时反演技术是无明显 BSR 或弱 BSR 水合物发育区的有效预测手段。

参考文献 (References):

- [1] Kvenvolden K A. Gas hydrates-Geological perspective and global change[J]. Rev. Geophys., 1993, 31(2): 173-187.
- [2] Collett T S. Energy resource potential of natural gas hydrates [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1971-1992.
- [3] 陈多福, 李绪宜, 夏斌. 南海琼东南盆地水合物稳定域分布特征及资源预测[J]. 地球物理学报, 2004, 47(3): 483-488.
Chen D F, Li X X, Xia B. Distribution of gas hydrate stable zones and resource prediction in the Qiongdongnan basin of the South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(3): 483-488.
- [4] 张光学, 祝有海, 徐华宁. 非活动大陆边缘的水合物及其成藏过程述评[J]. 地质评论, 2003, 49(2): 181-186.
Zhang G X, Zhu Y H, Xu H N. A Review of gas hydrate on the passive continental margin and its pool-formation process [J]. Geological Review, 2003, 49(2): 181-186, doi: 10.3321/j.issn: 0371-5736.2003.02.010.
- [5] 蒲晓强, 陶小晚, 张会领. 南海北部陆坡水合物存在的地球物理和地球化学特征[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(4): 620-626.
Pu X Q, Tao X W, Zhang H L. Geophysical and geochemical character of natural gas hydrate occurrence in northern continental slope of South China Sea [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(4): 620-626.

- [6] 龚跃华,张光学,郭依群,等.南海北部神狐海域水合物成矿远景[J].海洋地质与第四纪地质,2013,32(2):97-104.
Gong Y H,Zhang G X,Guo Y Q,et al.Prospect of gas hydrate resources in the area to southwest Shenhu of northern South China Sea[J].Marine Geology & Quaternary Geology,2013,32(2):97-104.
- [7] 苏丕波,乔少华,付少英,等.南海北部琼东南盆地水合物成藏数值模拟[J].天然气地球科学,2014,25(7):1111-1117.
Sun P B,Qiao S H,Fu S Y,et al.Numerical simulation of gas hydrate accumulation in Qiongdongnan basin, northern South China Sea[J].Natural Gas Geoscience,2014,25(7):1111-1117.
- [8] 徐华宁,杨胜雄,郑晓东,等.南中国海神狐海域水合物地震识别及分布特征[J].地球物理学报,2010,53(7):1691-1698.
Xun H N,Yang S X,Zheng X D,et al.Seismic identification of gas hydrate and its distribution in Shenhu Area, South China Sea[J].Chinese Journal of Geophysics,2010,53(7):1692-1698.
- [9] 杨睿,吴能友,白杰,等.南海北部无明显BSR地区水合物识别研究[J].地球物理学进展,2013,28(2):1033-1040.
Yang R,Wu N Y,Bai J,et al.Gas hydrate identification in non-BSR region, northern South China Sea[J].Progress in Geophysics,2013,28(2):1033-1040.
- [10] 宋海滨,张岭,江为为,等.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):182-186.
Song H B,Zhang L,Jiang W W,et al.Geophysical researches on marine gashydrates(III):bottom simulating reflections[J].Progress in Geophysics,2003,18(2):182-186.
- [11] 徐华宁,张光学,郑晓东,等.井震联合分析预测神狐海域水合物可能的垂向分布[J].地球物理学报,2014,57(10):3363-3371.
Xu H N,Zhang G X,Zheng X D,et al.Integrated analysis of well logs and seismic data to deduce the possible distribution in depth of gas hydrate in Shenhu Area, South China Sea[J].Chinese Journal of Geophysics,2014,57(10):3363-3371.
- [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):5653-573.
- [13] Tayler M I,Dillon W P,Pecher I A.Trapping and migration of methane associated with the gas hydrate stability zone at the Blake Ridge Diapir:new insights from seismic data[J].Marine Geology,2000,164:79-89.
- [14] 宋海滨,松林修,杨胜雄,等.海洋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):110-115.
Song H B,Song L X,Yang S X,et al.Geophysical researches on marine gashydrates(II):seismic methods[J].Progress in Geophysics,2001,16(3):110-115.
- [15] 沙志彬,梁金强,郑涛,等.地震属性在水合物预测中的应用[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(5):185-190.
Sha Z B,Liang J Q,Zheng T,et al.The application of seismic attributes to the prediction of gas hydrates[J].Marine Geology & Quaternary Geology,2013,33(5):185-190.
- [16] 王秀娟,吴时国,徐宁.地震属性参数在识别水合物和游离气分布模式中的应用[J].海洋与湖沼,2006,37(3):271-277.
Wang X J,Wu S G,Xu N.Determining the distribution model of hydrate and free gas occurrence in sediment with seismic attribute parameters[J].Oceanologia et limnologia sinica,2006,37(3):271-277.
- [17] Mosher D C,Pipe D J W,Campbell D C.Near-face geology and sediment-failure geohazards of the central Scotian Slope[J].American Association of Petroleum Geologists Bulletin,2004,8:703-723.
- [18] Mahapatra M,Mahapatra S.Seismic diffraction tomography technique using very fast simulated annealing method for delineating small subsurface features[J].Journal of Applied Geophysics,2009,67(2):125-129.
- [19] 万晓明,梁劲,梁金强,等.叠后波阻抗无井反演技术在T研究区水合物分布预测中的应用[J].物探与化探,2016,40(3):438-444.
Wan X M,Liang J,Liang J Q,et al.The application of post-stack impedance inversion without well to the prediction of gas hydrate distribution in T study area[J].Geophysical & Geochemical Exploration,2016,40(3):438-444.
- [20] 牛滨华,文鹏飞,温宁,等.基于BSR的AVO正演估算水合物含量方法的研究[J].地球物理学报,2006,49(1):143-151.
Niu B H,Wen P F,Wen N,et al.Estimation of hydrate concentration based on AVO modeling of BSR[J].Chinese Journal of Geophysics,2006,49(1):143-151.
- [21] 黄保家.琼东南盆地水合物潜力及有利勘探方向[J].天然气工业,1999,19(1):34-40.
Huang B J.Gas potential and its favorable exploration areas in Qiongdongnan basin[J].Natural Gas Industry,1999,19(1):34-40.
- [22] 王秀娟,吴时国,董冬冬,等.琼东南盆地气烟囱构造特点及其与水合物的关系[J].海洋地质与第四纪地质,2008,28(3):103-107.
Wang X J,Wu S G,Dong D D,et al.Characteristics of gas chimney and its relationship to gas hydrate in Qiongdongnan basin[J].Marine Geology & Quaternary Geology,2008,28(3):103-107.
- [23] 梁金强,王宏斌,苏新,等.南海北部陆坡水合物成藏条件及其控制因素[J].天然气工业,2014,34(7):128-134.
Liang J Q,Wang H B,Su X,et al.Natural gas hydrate formation conditions and the associated controlling factors in the northern slope of the South China Sea[J].Natural Gas Industry,2014,34(7):128-134.
- [24] 马云,李三忠,梁金强,等.南海北部琼东南盆地海底滑坡特征及其成因机制[J].吉林大学学报:地球科学版,2012,42(s3):197-203.
Ma Y,Li S Z,Liang J Q,et al.Characteristics and mechanism of submarine landslides in the Qiongdongnan basin, northern South China Sea[J].Journal of Jilin University:Earth Science Edition,2012,42(s3):197-203.
- [25] 张旭东.琼东南海域水合物地震反射特征[J].物探与化探,2014,38(6):1152-1158.
Zhang X D.The seismic reflection characteristics of gas hydrate in southeast Hainan sea area of the South China Sea[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2014,38(6):1152-1158.
- [26] 廖计华,王华,孙志鹏,等.琼东南盆地深水区长昌凹陷构造演

化及其对层序样式的控制[J].中南大学学报:自然科学版, 2012,43(8):3121-3131.

Liao J H, Wang H, Sun Z P, et al. Tectonic evolution and its controlling on sequence pattern of Chang-chang sag, deepwater area of

Qiongdongnan basin, South China Sea [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2012, 43(8):3121-3131.

The application of pre-stack simultaneous inversion to gas hydrates reservoir prediction in the western Pearl River Mouth basin

SHA Zhi-Bin^{1,2}, WAN Xiao-Ming², ZHAO Zhong-Quan², LIANG Jin-Qiang²,
YANG Rui-Zhao³, BAI Yu⁴, CHAI Yi²

(1. Faculty of Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 3. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Beijing Yubo Innovation Geophysics Technology Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: Weak BSR or no BSR is developed in western Pearl River Mouth basin. The conventional post-stack inversion obtains only one parameter, and it is difficult to accurately predict the gas hydrates distribution characteristics. Based on seismic gather optimization, fine velocity analysis, petrophysical analysis and accurate establishment of low-frequency models, the authors used pre-stack simultaneous inversion technology to predict gas hydrate reservoirs in western Pearl River Mouth basin, adopted facies and fluid probabilities analysis technology to comprehensively identify the gas hydrate reservoirs in the study area, and achieved a fine characterization of the gas hydrates. The inversion prediction results show that the gas hydrates are developed well in the study area, and the prediction results are consistent with the drilling results, implying that the application effect of pre-stack simultaneous inversion technology is ideal.

Key words: gas hydrates; pre-stack simultaneous inversion; reservoir prediction; facies and fluid probabilities analysis; western Pearl River Mouth basin

(本文编辑:叶佩)