

黄时卓, 宋鹏, 朱继田, 等. 基于深水区宽频地震的天然气水合物识别方法[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(7): 52-59.

# 基于深水区宽频地震的天然气水合物识别方法

黄时卓, 宋鹏, 朱继田, 李芳, 毛雪莲, 廖键

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524000)

**摘要:** 仅利用地震似海底反射 (BSR) 识别琼东南盆地深水区天然气水合物存在一定的局限性, 从而影响天然气水合物的勘探成效。笔者利用天然气水合物已钻井数据, 分析该盆地深水区天然气水合物岩石弹性参数特征, 用以查明天然气水合物的岩石物理规律; 同时, 利用地震正演模拟, 明确了研究区发育的孔隙型、烟囱型水合物的地震反射特征。在此基础上, 利用 AVO 正演判识真假 BSR: 天然气水合物底界面反射具有 III 类 AVO 且存在 AVO 异常, 此为真 BSR 反射; 而块体流 (MTD) 底界面虽类似 BSR 反射, 但其 AVO 为 IV 类且 AVO 无异常特征。利用宽频地震数据和三维地震速度体进行速度模型下的宽频确定性反演, 并通过高速异常、高阻抗异常描述天然气水合物发育情况。总之, 利用地震反射特征、AVO 特征、无井宽频地震反演等手段, 实现了琼东南盆地深水区多种类型天然气水合物的地震识别, 判识圈定了水合物矿藏。

**关键词:** 琼东南盆地; 天然气水合物; 地震反射特征; BSR; AVO 特征; 宽频地震叠后反演

中图分类号: P744.4; P539.1

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.085

## 0 引言

中国在南海已开展了近 20 年的天然气水合物勘探试采方面的实践与研究, 并在南海北部获得了天然气水合物实物样品。南海北部琼东南盆地油气资源丰富, 具备天然气水合物成矿条件<sup>[1-3]</sup>。近几年来, 中国地质调查局在琼东南盆地针对天然气水合物进行了一系列调查, 获得了多个发现, 证实琼东南盆地南部深水区具有巨大的天然气水合物资源潜力<sup>[4-5]</sup>。虽然目前国内海域天然气水合物勘探开发研究进展较迅速, 但相对常规油气, 天然气水合物仍处于资源普查以及开采试验阶段。天然气水合物勘探与常规油气勘探存在较大的区别, 目前天然气水合物勘探评价技术尚不甚完善, 海洋天然气水合物地震识别主要依赖 BSR 反射。迄今为止, BSR 仍然是目前国内天然气水合物识别的主要标志<sup>[6-8]</sup>, 然而, 由于琼东南盆地水合物稳定域大部

分位于深海平原区, 深海平原区第四系浅部地层与海底基本上近似平行, 导致 BSR 隐蔽于浅部水平地震反射层中, 造成水合物识别非常困难。勘探实践亦表明, BSR 与天然气水合物储层并非一一对应, 深水海底浅层含砂层也常表现为与海底极性相反的强地震反射特征, 容易与 BSR 混淆, 此外, 地震资料中的多次波、气泡效应等现象也会出现类似 BSR 的地震反射特征, 给天然气水合物识别造成较大困难, 因此, 如何判别确定真假 BSR 即成了该区天然气水合物勘探评价的难点。琼东南盆地深水区浅层发育众多的“小烟囱”, 广州海洋地质调查局在 2018 年天然气水合物钻井中已经证实浅层烟囱是水合物运聚分布的重要场所<sup>[9]</sup>, 而这类烟囱型水合物在地震上没有 BSR 反射特征, 故对于这种无 BSR 反射特征的天然气水合物如何识别, 亦成了该区水合物勘探评价的另一难点。鉴此, 本文根据琼东南盆地深水水合物勘探评价的实际, 重点针对深水海底浅层处理的宽频三维地震和天然气水合物测井资料, 采用地震叠后正演、AVO 分析、宽频地震无井反演等手段, 对具有一系列可疑 BSR 反射地震异常体、烟囱型地震异常体等进行分析, 确定了真假 BSR、烟囱型天然气水合物的判识方法, 并成功识别出了该区存在的孔隙型和烟囱型 2 种类

收稿日期: 2021-04-08

资助项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)项目“南海天然气水合物富集规律及固态硫化开采机理研究(一期)”(ZJW-2019-03)

作者简介: 黄时卓(1990—), 男, 工程师, 主要从事海洋油气勘探研究工作。E-mail: huangshz7@cnooc.com.cn

型的天然气水合物, 圈定了其分布范围, 以期为后续的水合物井位部署及资源量计算等提供重要依据。

## 1 研究区地质概况

琼东南盆地位于南海北部大陆边缘西区, 呈 NE—SW 向展布, 西邻莺歌海盆地, 东接珠江口盆地, 北处海南岛以南, 南连西沙隆起<sup>[10-11]</sup>。新生代盆地形成演化经历了古近纪陆相裂陷和新近纪—第四纪海相拗陷 2 个阶段, 构成了典型的断拗双层盆地结构。主要沉积充填了古近系始新统湖相、渐新统崖城组煤系和中新统三亚组、梅山组及黄流组及第四系乐东组海相地层<sup>[12]</sup>。盆地主要烃源岩为渐新世早期沉积的崖城组煤系及浅海相泥岩, 其中浅海相泥岩 TOC > 1.0%, 煤系 TOC 较高, 多达 2%~5%。盆地古近系断裂较发育, 而新近系断裂仅在局部区域较发育。深水海底浅层水合物气源供给运聚通道系统主要由局部的深部大断裂与气烟囱及浅层断裂所构成。盆地地温梯度较高, 最新钻探揭示该区域平均地温梯度达 60 °C/km, 局部强流体活动区域地温梯度可达 100 °C/km。琼东南盆地南部陆坡

深水区发育大规模块体流、大型峡谷水道和底辟等特殊地质体, 是南海北部水合物勘探的重要靶区<sup>[13]</sup>。该区邻近的陵水凹陷及北礁凹陷深部已勘探发现了陵水 17-2、陵水 18-1 等多个大中型天然气气田<sup>[14]</sup>, 天然气运聚成藏条件尤其是气源供给条件优越。同时, 研究区局部区域深部断裂及浅层裂隙较发育, 且与气烟囱及浅层断层裂隙连通性较好, 构成了深部天然气运移至深水海底浅层天然气水合物藏的良好运聚通道。此外, 研究区处于深海平原区, 第四纪多期海退有利于该区重力流沉积发育, 易形成浊积扇、水道和块体流等砂质沉积体, 其亦为浅层气富集尤其是深水海底浅表层水合物赋存等奠定了较好的地质基础。研究区具有 2 批次三维地震资料, 分别为非宽频地震资料(图 1a)和宽频地震资料(图 1b)。宽频地震相较非宽频地震旁瓣更小, 分辨率更高; 在地震反射能量上, 宽频地震的穿透能力更强, 强反射屏蔽下的能量恢复更好, 模糊区成像更好。宽频地震更利于天然气水合物顶界面识别、冰气共存段的精细刻画以及强屏蔽下浅层气的预测, 因此, 本次选择在宽频地震上开展天然气水合物识别。

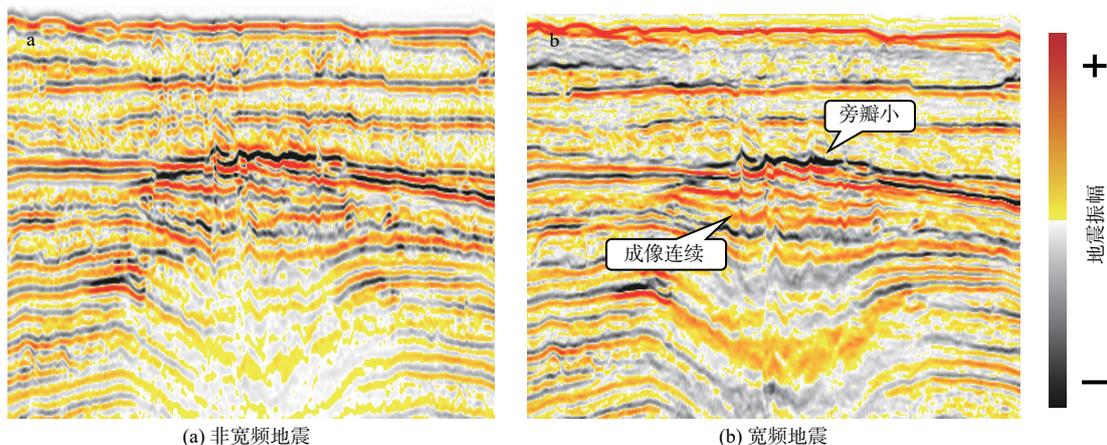


图 1 过天然气水合物目标地震剖面

Fig.1 Post stack seismic profile passing through gas hydrate

## 2 天然气水合物识别

### 2.1 岩石物理特征

从琼东南盆地深水区已钻井分析发现, 含天然气水合物地层的纵波、横波速度分别为 1 660~1 840 m/s、460~520 m/s, 密度为 1.8~2.0 g/cm<sup>3</sup>, 纵波阻抗为 3 000~3 700 g/cm<sup>3</sup>·m/s; 含游离气地层纵波、横

波速度分别为 1 570~1 680 m/s、370~440 m/s, 密度为 1.6~1.8 g/cm<sup>3</sup>, 纵波阻抗为 2 600~3 000 g/cm<sup>3</sup>·m/s。琼东南盆地深水区含水合物地层具有高纵波速度、高纵波阻抗特征, 含游离气地层常具有低纵波速度、低密度、低纵波阻抗特征(图 2)。

### 2.2 地震反射特征

琼东南盆地主要发育孔隙型和烟囱型水合物。前者以孔隙充填的形式赋存于浅部发育的重力流

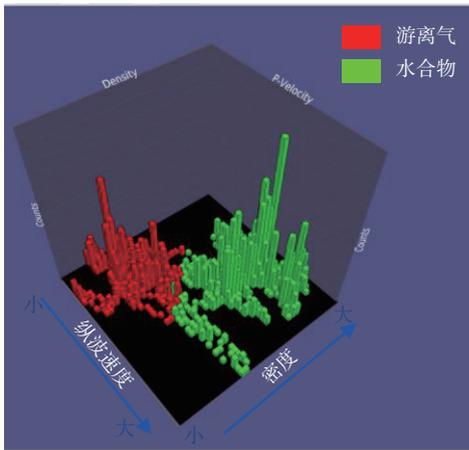


图2 琼东南盆地深水区已钻井游离气层和水合物层速度-密度交会图

Fig.2 Cross plot of velocity and density of gas hydrate drilled in the Qiongdongnan Basin

高孔隙碎屑岩中,水合物成为孔隙流体(或固体骨架)的一部分;后者以裂隙充填的形式存在于烟囱通道内,形成脉状、层状和透镜状的纯水合物。由于赋存场所和赋存方式的不同,两者在地震剖面上

表现出不同的反射特征。

烟囱型水合物(亦称之为裂隙型水合物)是含气流体通过烟囱通道系统垂直向上运移至天然气水合物稳定域,在烟囱附近及其上部形成的。烟囱构造是流体作用引发的一种特殊的伴生构造,是在气藏超压、构造低应力和泥页岩封隔层综合作用下形成的。受流体活动性影响,烟囱构造具有明显的幕式张合特征,在地震剖面上呈现明显的柱状外形,平面上可呈椭圆状或锥形体反射结构;受裂缝影响,地震反射往往表现为弱震幅、连续性差的特征;烟囱型水合物还具其他伴生地震反射现象,如海底凹陷、浅层断层等<sup>[15-19]</sup>。正演分析结果表明(图3),稳定域以内,受烟囱内水合物的影响,烟囱内部地层速度升高,含水合物烟囱在地震剖面上呈现同相轴上拱特征;稳定域以下,受下部游离气影响,烟囱内部地层速度降低,气烟囱在地震剖面上呈现同相轴下拉特征。烟囱型天然气水合物在地震剖面上无BSR反射,无法通过BSR反射进行烟囱型水合物的判识与确定。

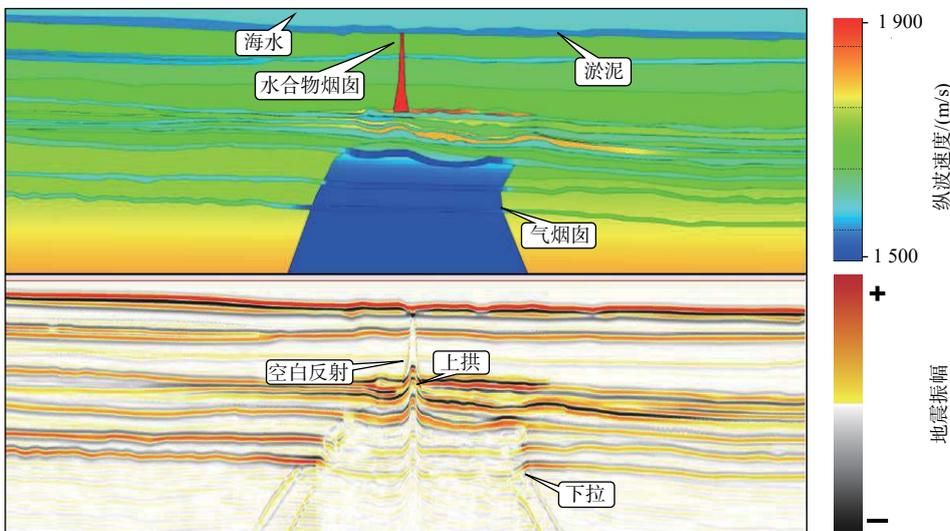


图3 烟囱型天然气水合物地震正演模型

Fig.3 Seismic forward modeling for chimney type of hydrate

琼东南盆地孔隙型水合物主要发育在第四纪多期海退时形成的浊积扇、水道等富砂储集体中,BSR是该类水合物赋存的主要地球物理标志。天然气水合物进入孔隙成为流体(或骨架)的一部分,使储集层速度升高,形成高阻抗地层,其与下伏正常地层存在阻抗差异,在地震剖面常会出现一强振幅、平行海底、与海底极性相反的反射波,该反射波称之为似海底反射(BSR)。BSR大致代表天然气水合物层的底界,其上为固态的水合物层段,其下

为游离气。受水合物饱和度渐变的影响,水合物层顶部波峰反射不明显,地震表现出空白反射特征,水合物层的顶界较难判断。不同类型的气源会形成不同类型的水合物(I型、II型),天然气水合物稳定域底界深度与其类型相关,当不同类型水合物共存时,在地震上会表现为一套近似平行海底的强振幅反射波组,即一组BSR反射。通过地震正演分析发现,在崎岖海底下,BSR反射易于识别(图4),和正常地层呈明显的不整合,同相轴发生相变。当

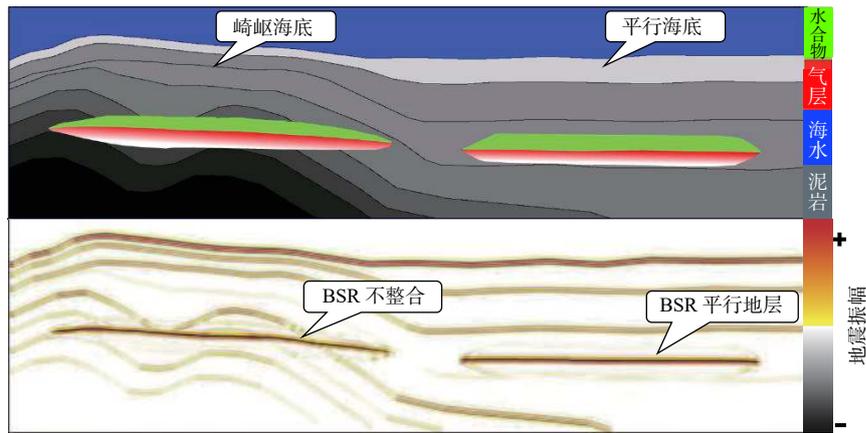


图 4 孔隙型天然气水合物地震正演模型

Fig.4 Forward modeling of pore type hydrate

海底和浅部地层较为平整时, BSR 与地层呈平行整合, 较难与正常地层区分(图 4)。

演分析表明, 薄层、厚层天然气水合物底界面(BSR)都具有强 III 类 AVO(图 5)。

### 2.3 AVO 特征

利用研究区 H8 井测井参数(表 1)及 30 Hz 雷克子波, 采用 Zoeppritz 计算式对水合物层底界面进行叠前正演, 获取单点叠前角度道集, 并分析其 AVO 特征。不同厚度水合物底界面(BSR)AVO 正

表 1 AVO 正演参数表

Table 1 AVO forward modeling parameters

	纵波速度/(m/s)	横波速度/(m/s)	密度/(kg/m <sup>3</sup> )
背景泥	1 689	420	2 000
水合物层	1 830	495	1 823
气层	1 630	440	1 777

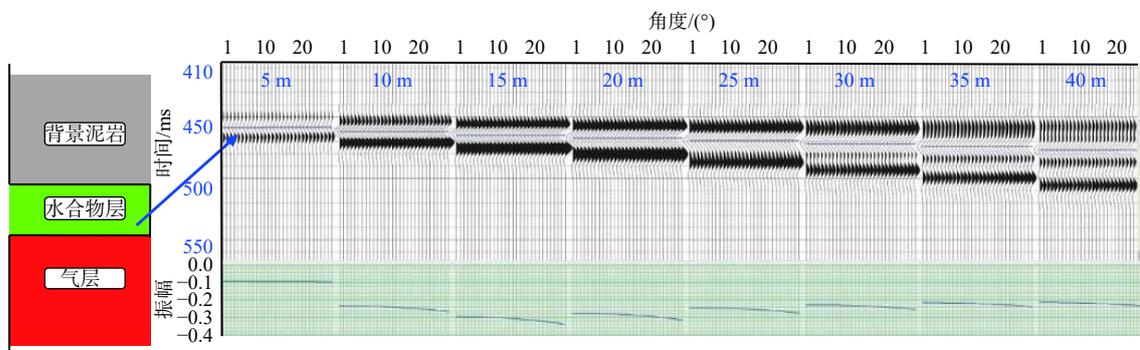


图 5 孔隙型天然气水合物 AVO 正演特征分析

Fig.5 AVO forward analysis chart for pore type hydrate

### 2.4 宽频叠后反演特征

岩石物理分析表明, 纵波阻抗可以作为识别天然气水合物的敏感弹性参数, 只要具备可靠的反演纵波阻抗就能实现对天然气水合物的钻前预测。受制于天然气水合物横向变化快(特别是烟囱型水合物)、浅部地层钻井测井少等问题, 如何建立一个可靠的反演低频模型成为研究区反演最为关键的问题。常规的反演低频模型都是井曲线在层位约束下插值而来, 这种建模方式是假定地层等时沉积(满足层序概念), 还要求井网密度够大<sup>[20-22]</sup>, 地层

横向变化小; 而研究区已钻井少, 天然气水合物成藏受温压场控制, 不受沉积层序控制(穿时), 烟囱型水合物发育范围也有限, 常规的井插值建立反演低频模型的方式不适用于研究区, 因此, 本文采用速度模型下的宽频叠后确定性反演方法。

研究区原始地震体资料有效频带较宽, 目的层主频为 50 Hz, 频带宽度为 4~80 Hz。地震速度体只能提供 2 Hz 以下的频带数据, 2~4 Hz 频带缺失。为弥补缺失的频带, 对地震数据进行去鬼波处理, 拓宽地震数据频带(图 6a)。去鬼波后地震数据主频为 50 Hz, 频带宽度为 1~140 Hz, 为宽

频地震数据。用该宽频数据和速度体联合反演，反演体频带为0~140 Hz，能满足研究区勘探需求。具体操作如下：利用井矫正地震速度场，然后利用井上拟合的速度和阻抗关系转化速度场为甚低频

模型(<2 Hz)，再利用井和宽频数据，提取宽频子波。宽频地震数据、甚低频模型、宽频子波一起进行稀疏脉冲反演<sup>[21-25]</sup>，获得确定性叠后阻抗(图6)。

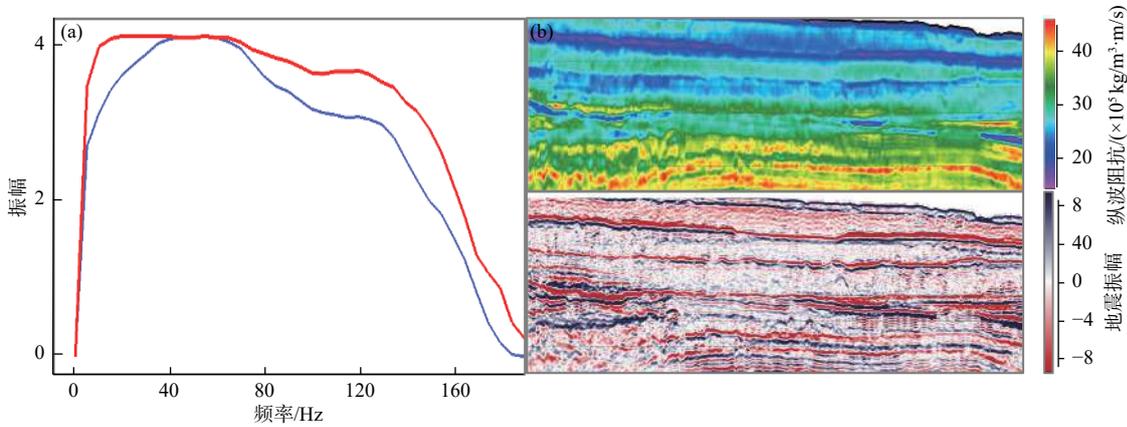


图6 地震频谱及反演阻抗特征

Fig.6 Seismic spectrum and inversion impedance diagram

综合考虑研究区天然气水合物地震、AVO和反演等特征，制定了琼东南盆地天然气水合物地震识别方法。首先，针对地质目标体进行反射特征分析，明确其是否具备孔隙型或烟囱型水合物反射特

征；其次，对其中可疑BSR反射进行AVO分析，若为Ⅲ类AVO且存在AVO异常，则为真BSR反射；再次，对无BSR反射的异常目标，进行宽频反演，分析其阻抗特征和速度特征(图7)。

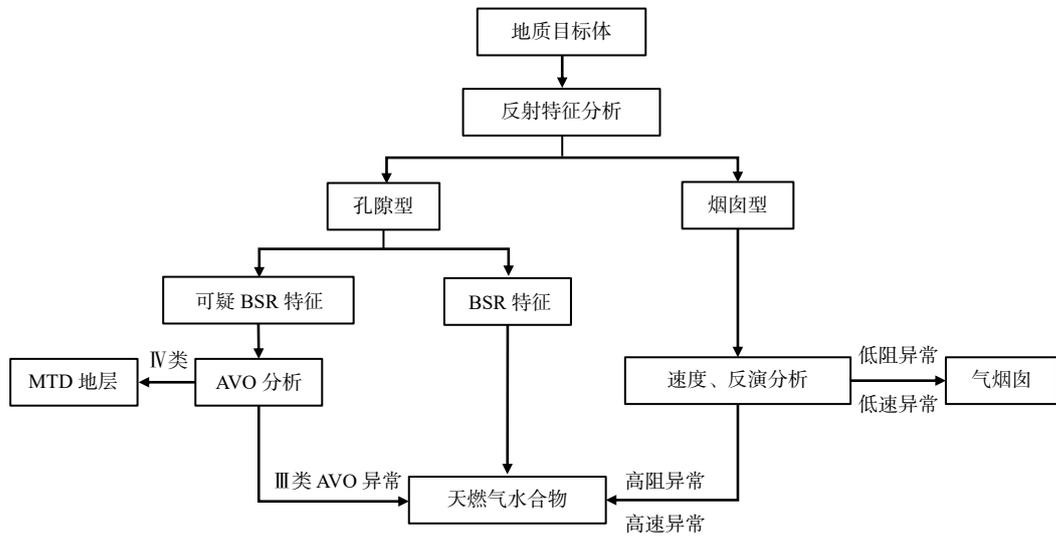


图7 琼东南盆地深水天然气水合物地震识别流程

Fig.7 Flow chart of gas hydrate identification in the Qiongdongnan Basin

### 3 应用实例

琼东南盆地L区是天然气水合物勘探的重点领域，该处水深约1700 m，海底温度约3℃。通过波诺列夫法计算天然气水合物稳定域范围为海底以下300 m以内。L28目标位于地震2.5 s，距离海底大约为250 m。该目标深部发育底辟构造，底部

崖城组生烃通过底辟运移至浅部储集体内成藏。该目标在地震剖面上可以分上下两部分，上部发育烟囱构造，底部和顶部总共发育3套强波谷地震反射(层A、B、C)。烟囱内部出现明显的上拱，内部为杂乱或空白反射，顶部海底有下凹特征；3套强反射同相轴都具有平行海底特征，局部也有同相轴发生相变(图8)。由于该处为海底平原，乐东组地层平行于海底，因此，无法确定3套强反射是否为

BSR。从叠前道集单点 AVO 分析来看(图 9), 层 A 为 IV 类 AVO 且无异常, 层 B、C 都是 III 类 AVO 且有 AVO 异常。AVO 分析结果表明, 层 A 为 MTD

底界面反射, 层 B、C 为 BSR 反射可能性大。从地震速度特征来看(图 10), 烟囱内部具有明显的高速异常, 底部具有低速异常; 从宽频叠后反演结果来

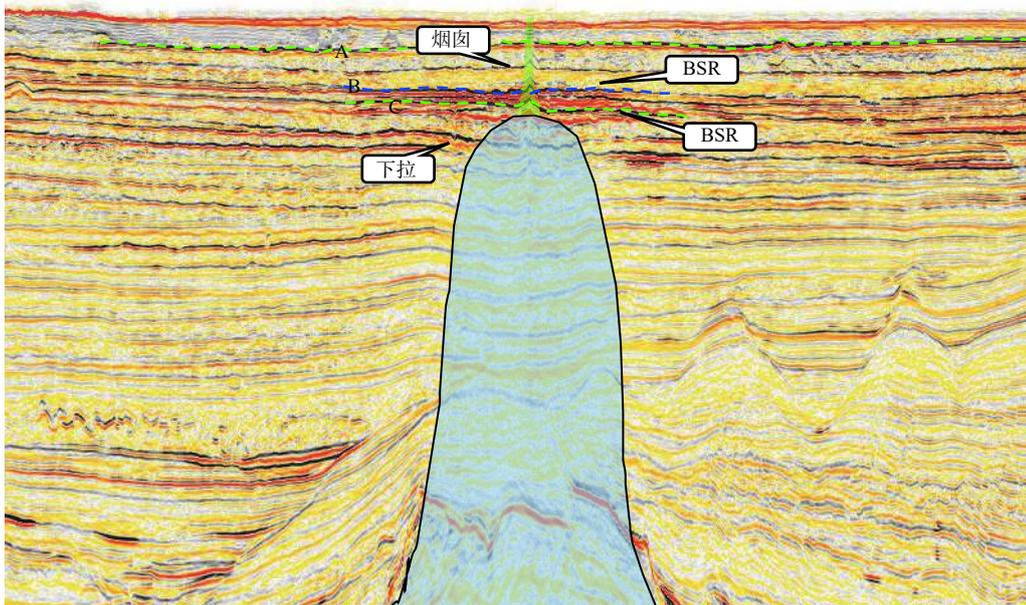


图 8 通过 L28 水合物目标的叠后标定地震剖面

Fig.8 Post stack seismic profile of L28

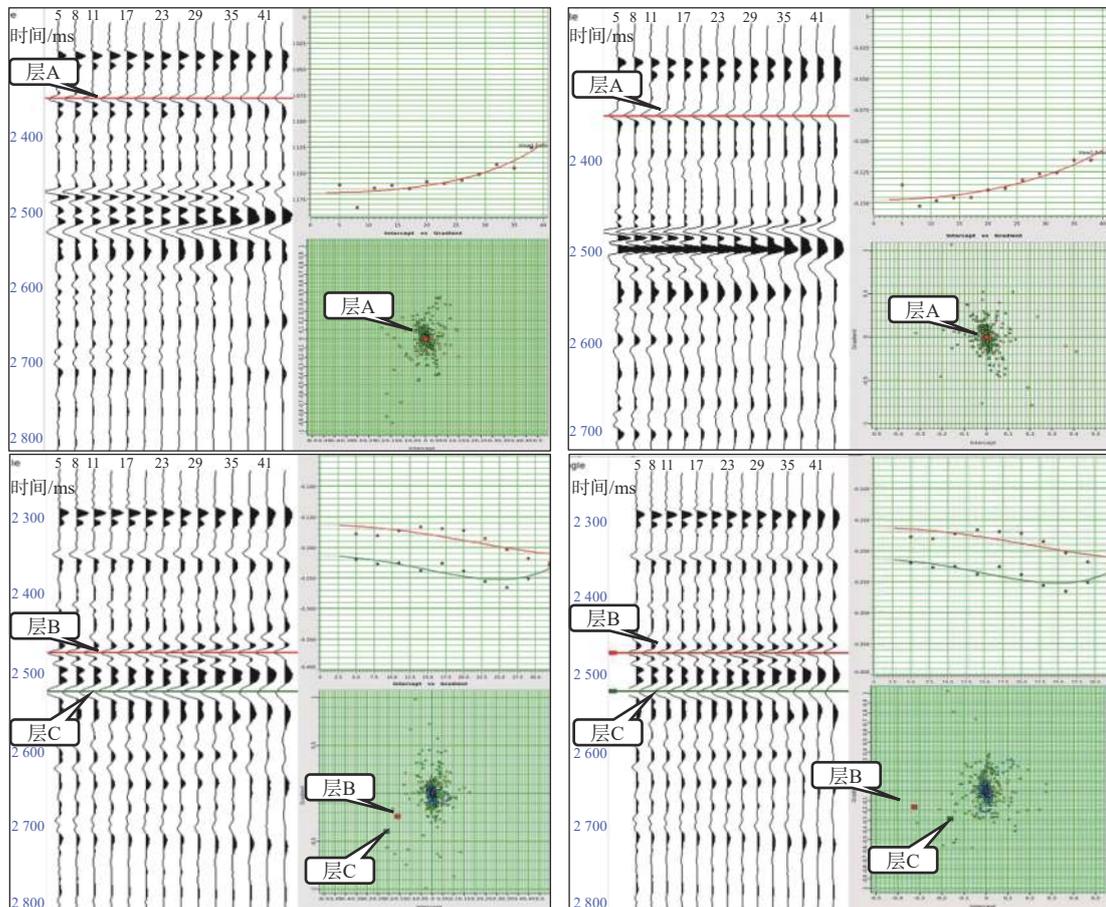


图 9 L28 水合物目标道集 AVO 特征

Fig.9 AVO characteristics of L28 target prestack gathers

看(图 11), 烟囱内部具有高阻抗特征, 底部相对围岩具有低阻抗特征, 层 A 无高阻抗异常, 层 B、C 为高低阻抗相间出现(为多套水合物游离气特征)。

综合地震、AVO 和反演阻抗特征推测, 烟囱内部发育烟囱型天然气水合物, 层 B 和 C 发育孔隙型水合物, 底部超出稳定域范围发育游离气层。

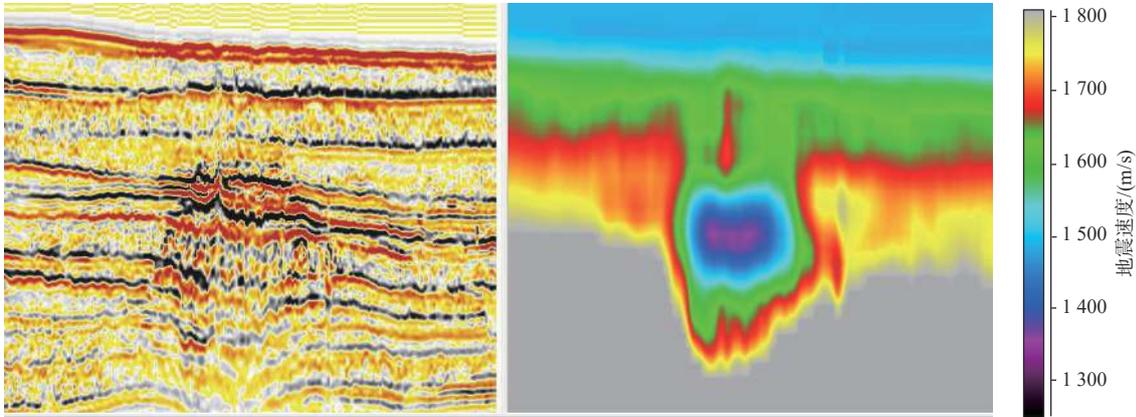


图 10 通过 L28 水合物目标地震及速度剖面特征

Fig.10 Post stack seismic and seismic velocity profiles of L28

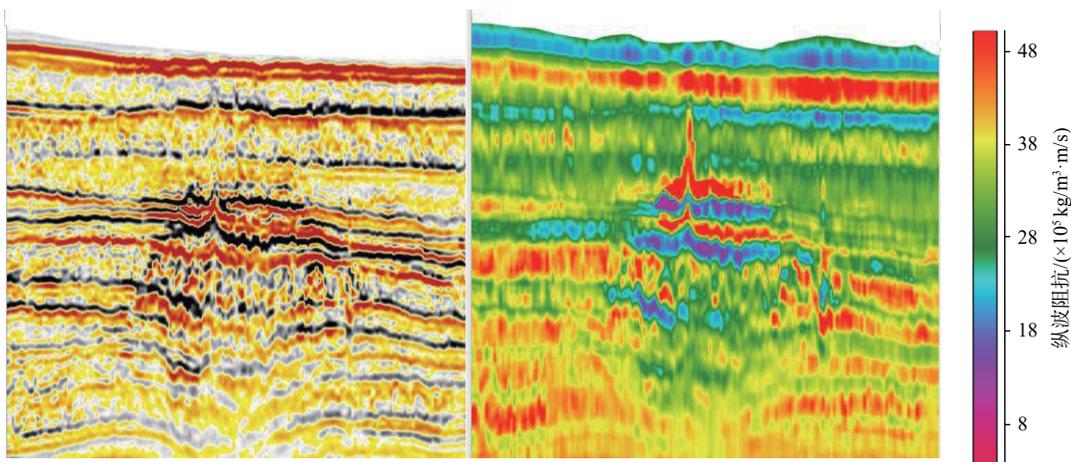


图 11 通过 L28 水合物目标宽频反演纵波阻抗剖面特征

Fig.11 Post stack seismic and inversion of Pimpedance profiles of L28

## 4 结论

(1) 琼东南盆地发育烟囱型和孔隙型水合物矿藏, 前者地震有烟囱外形, 水合物烟囱内部同相轴上拱, 地震速度体上有高速异常, 反演体上有高阻抗特征。后者在地震上具有平行海底的 BSR 反射, AVO 类型为 III 类, 反演体上水合物层有高阻抗特征; 气烟囱内部同相轴下拉, 地震速度具有低速异常, 反演体上具有低阻抗异常。

(2) 利用去鬼波技术能有效拓宽深水地震频带, 获得的宽频地震具有旁瓣小、分辨率高、保幅性好等特点; 结合地震速度体实现浅层少井情况下的地震反演, 反演结果能实现对烟囱型和孔隙型水

合物的有效预测。

(3) 琼东南盆地 L28 区具有天然气水合物优越的成藏条件, 地震反射特征、地震速度特征、AVO 特征、阻抗特征等都指示该区可能存在天然气水合物矿藏。

### 参考文献:

- [1] 朱继田, 邓勇, 郭明刚, 等. 琼东南盆地盆底平原区天然气水合物成矿条件及成藏模式[J]. 中国海上油气, 2020, 32(3): 10-19.
- [2] 何家雄, 李福元, 王后金, 等. 南海北部大陆边缘深水盆地成因机制与油气资源效应[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(3): 1-11.
- [3] 王静丽, 梁金强, 沙志彬, 等. 南海北部琼东南海域气烟囱发育特征及其对水合物形成与分布的影响[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(3): 1-6.

- [4] 何家雄, 马文宏, 祝有海, 等. 南海北部边缘盆地天然气成因类型及运聚规律与勘探新领域[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(4): 1-10.
- [5] 蒲燕萍, 孙春岩, 陈世成, 等. 南海琼东南盆地-西沙海槽天然气水合物地球化学勘探与资源远景评价[J]. 地质通报, 2009, 28(11): 1657-1661.
- [6] 龚建明, 廖晶, 孙晶, 等. 巴基斯坦马克兰增生楔天然气水合物的主控因素[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(12): 10-15.
- [7] 岳振欢, 童思友, 吴志强, 等. 地震多参数约束下的真假BSR识别[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(12): 60-66.
- [8] 潘冬阳, 陈晨, 谢雪恋, 等. 南海天然气水合物储层的叠后地震属性分析[J]. 西部探矿工程, 2020, 28(11): 46-49.
- [9] 黄伟, 张伟, 梁金强, 等. 琼东南盆地和郁陵盆地天然气水合物成藏对比研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 363-379.
- [10] 朱继田, 裴健翔, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地新构造运动及其对晚期油气成藏的控制[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(4): 649-656.
- [11] 唐历山, 朱继田, 姚哲, 等. 琼东南盆地松南低凸起潜山演化及成藏条件[J]. 特种油气藏, 2017, 24(1): 87-91.
- [12] 周杰, 杨希冰, 杨金海, 等. 琼东南盆地松南低凸起古近系构造-沉积演化特征与天然气成藏[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2704-2716.
- [13] 左倩媚, 张道军, 何卫军, 等. 琼东南盆地深水区中央峡谷黄流组物源特征[J]. 海洋学报, 2015, 37(5): 9-16.
- [14] 陈奎, 杨希冰, 胡林, 等. 琼东南盆地深水勘探成熟区目标搜索技术体系研究及应用成效[J]. 中国海上油气, 2020, 32(3): 33-41.
- [15] 刘杰, 杨睿, 张金华, 等. 琼东南盆地华光凹陷天然气水合物成藏条件及有利区带预测[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(1): 134-142.
- [16] 赖亦君, 杨涛, 梁金强, 等. 南海北部陆坡珠江口盆地东南海域GMGS2-09井孔隙水地球化学特征及其对天然气水合物的指示意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(3): 135-142.
- [17] 张伟, 梁金强, 陆敬安, 等. 琼东南盆地典型渗漏型天然气水合物成藏系统的特征与控藏机制[J]. 天然气工业, 2020, 40(8): 90-99.
- [18] 吴能友, 孙治雷, 卢建国, 等. 冲绳海槽海底冷泉-热液系统相互作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(5): 23-35.
- [19] 罗伟, 蔡俊杰, 万琼华, 等. 惠州凹陷花岗岩潜山储层条件分析及石油地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(4): 126-135.
- [20] 陈祖银, 应明雄, 贺懿, 等. 基于多重积分的低频补偿反演方法研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(36): 1-16.
- [21] 贾凌霄, 王彦春, 菅笑飞, 等. 叠后地震反演面临的问题与进展[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 2108-2115.
- [22] 张宏, 杨春峰, 常炳章, 等. 叠后地震反演方法联合应用研究[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(5): 246-250.
- [23] 李杰, 何敏, 颜承志, 等. 南海北部荔湾3区块天然气水合物分布特征及目标识别[J]. 海洋科学, 2019, 43(5): 81-89.
- [24] 李元平, 颜承志, 李杰, 等. 宽频地震无井反演技术在神狐海域天然气水合物矿体描述中的应用[J]. 中国海上油气, 2019, 31(1): 51-60.
- [25] 叶云飞, 刘春成. 深水宽频地震资料反演及地震属性分析[J]. 海洋工程装备与技术, 2019, 6(S1): 268-271.

## RESEARCH ON THE METHOD FOR GAS HYDRATE IDENTIFICATION BASED ON BROADBAND SEISMIC IN DEEP WATER AREAS

HUANG Shizhuo, SONG Peng, ZHU Jitian, LI Fang, MAO Xuelian, LIAO Jian

(Zhanjiang Branch of CNOOC Limited, Zhanjiang 524057, China)

**Abstract:** In the deep water areas of the Qiongdongnan Basin, it is difficult to make clear the occurrence of gas hydrate only with the seismic reflection data of BSR, which influences gas hydrate exploration. Based on the drilling data and the characteristics of the elastic parameters of gas hydrate bearing rocks in the basin, the physical properties of gas hydrate are clarified. Seismic forward modeling is adopted to distinguish the seismic reflection characteristics of the pore type hydrate from the chimney type hydrate. Then based on the AVO forward modeling, it is confirmed that the gas hydrate bottom interface (BSR) has the class III AVO anomaly, while the MTD bottom interface, similar to the BSR reflection, shows the class IV AVO anomaly. Broadband seismic data and 3D seismic velocity volume are used for broadband deterministic inversion under the velocity model. With high velocity and high impedance anomalies, the occurrence and development status of gas hydrate are described. Integrating the methods of seismic reflection characteristics analysis, AVO characteristics analysis, well free broadband seismic inversion analysis and other means, various types of gas hydrate are discovered in the deep water area of the Qiongdongnan Basin, indicating the effectiveness of the broadband seismic method.

**Key words:** Qiongdongnan Basin; gas hydrate; seismic reflection characteristics; BSR; AVO characteristics; broadband seismic post stack inversion