

南海北部揭阳凹陷天然气水合物的地震 异常特征分析*

李杰^{1,2} 何敏^{1,2} 颜承志^{1,2} 李元平^{1,2} 靳佳澎³

(1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司 深圳 518054; 2. 中海石油深海开发有限公司 深圳 518054;
3. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

摘要 大量研究表明南海北部珠江口盆地是天然气水合物发育区,但是该盆地东部揭阳凹陷水合物研究较少。本文利用揭阳凹陷新采集三维地震资料,对该三维地震资料进行成像道集优化和叠前时间偏移处理,得到针对水合物的新处理地震数据体,并通过高精度网格层析反演得到层速度数据体。利用该数据开展叠后约束稀疏脉冲反演,获得含天然气水合物地层波阻抗异常,综合分析反演与地震属性识别水合物。从新处理地震资料看,该区域似海底反射(bottom simulation reflection, BSR)反射呈连续、不连续与地层斜交等特征,BSR 发育在一个继承性小型水道上,且下部断裂和气烟囱发育。通过分析 BSR 特征及 BSR 上下地层的速度、波阻抗、振幅、频率、相干等属性异常,结合水合物成藏条件,发现了南海北部新的天然气水合物有利富集区,为该区域水合物勘探提供基础。

关键词 天然气水合物; 揭阳凹陷; 地震反演; 水合物成藏

中图分类号 P618.13 **doi:** 10.11693/hyhz20191100218

天然气水合物是由水分子与甲烷分子在低温、高压环境下形成的一种类似于冰的固态化合物(Sloan, 1998; Sloan *et al.*, 2008)。目前已经在南海北部多个盆地通过钻探证实存在大量天然气水合物,自 2007 年以来,广州海洋地质调查局在南海北部进行了多个水合物取样、钻探航次,发现南海北部陆坡地区存在孔隙和裂隙充填型水合物(Wang *et al.*, 2011; Sha *et al.*, 2015),特别是神狐海域天然气水合物大量钻探表明,水合物层厚度从几米至七十多米不等,且饱和度最高能达到 60%左右(Yang *et al.*, 2017; Qian *et al.*, 2018),并开展了试验开采工作(Li *et al.*, 2018),实现了连续 2 个月稳定开发。

利用反射地震调查与解释、测井评价、岩石物理和成藏系统分析等技术方法,在南海北部开展了天然气水合物大量的研究工作(宋海斌等, 2001; 陈多福等, 2005; 刘学伟等, 2005; 吴能友等, 2007; 阎贫和陈多福, 2009; 栾锡武等, 2010; 张光学等, 2011;

Wang *et al.*, 2011; Qian *et al.*, 2018; 王秀娟等, 2017),形成识别和定量评价天然气水合物方法。但是从大量研究来看,南海北部水合物研究主要集中在珠江口盆地、琼东南盆地、中建盆地与台西南盆地(Lin *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2014; Sha *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015),而其他区域研究程度相对较低。

近期,中海石油(中国)有限公司与台湾合作,对南海北部东沙隆起东部的揭阳凹陷采集了三维地震资料,由于区内缺少浅层测井数据,本文主要根据指示天然气水合物存在的地球物理异常特征,结合该区域的实际地震资料情况,对调查区新采集地震资料进行成像道集优化和叠前地震处理,通过网格层析反演得到高精度速度和叠前深度数据体,系统分析该区域潜在天然气水合物地质条件,并对该区域发育的似海底反射(bottom simulation reflection, BSR)、流体运移有利通道、断裂与气烟囱分布特征进行研究,新发现了天然气水合物有利发育区,为下

* “十三五”国家重点研发计划项目子课题, 2017YFC0307301-1 号; 国家高技术研究发展计划(863 计划)课题, 2013AA092601 号。李杰, 工程师, E-mail: lijie51@cnooc.com.cn

收稿日期: 2019-11-19, 收修改稿日期: 2020-01-13

一步开展勘探提供研究基础。

1 区域地质概况

研究区位于南海北部东沙隆起带以东, 潮汕坳陷北东方向(图 1a)。潮汕坳陷主要呈北东-南西走向, 为一个残留的中生代盆地(赵淑娟等, 2012), 与珠江口盆地明显差异的是, 潮汕坳陷中生代沉积为主, 沉积最厚约为 5200m, 新生代沉积较薄。前人研究显示东沙海域及其东部的潮汕坳陷在晚中新世末-早上新世初(5.5Ma)经历了一次重要的构造运动-东沙运动, 其在构造上主要表现为断块升降, 在隆起区上覆沉积层受到强烈侵蚀作用, 造成中新世及部分上新世地层缺失, 在东沙及其东部海域形成大量张性断层, 部分断层为切穿海底及基底“通天断层”(Li *et al.*, 2008; Yan *et al.*, 2014; 刘涛, 2019)。另外潮汕坳陷是

油气勘探潜力区, 侏罗系海相沉积被认为是有利油气储层地层, 匹配区域发育的大量正断层, 该地区被认为是水合物有利勘探区(Yan *et al.*, 2006)。

本研究利用该区域针对水合物保幅处理三维地震资料和速度场信息, 面积约130km²。利用三维地震资料解释的水深变化范围为1100—1500m。从海底地形看, 研究区峡谷发育, 沉积类型复杂多变, 主要发育水下扇体(图1b)。由于受到海底峡谷水道的频繁侵蚀, 水合物稳定带底部位于10.5—16Ma (T30—T40)之间(图1c)(刘涛, 2019; 吴晓川等, 2019)。在疑似BSR下方发育大片模糊反射区, 具有明显的“气通道”反射特征, 表明中深部气运移通道发育。另外, 地震剖面上断层非常发育, 表现为多期拉张作用下发育的“X”型正断层, 断层断面平直、活动持续时间较长, 浅层断层发育, 多数断层断至海底(图1c)。

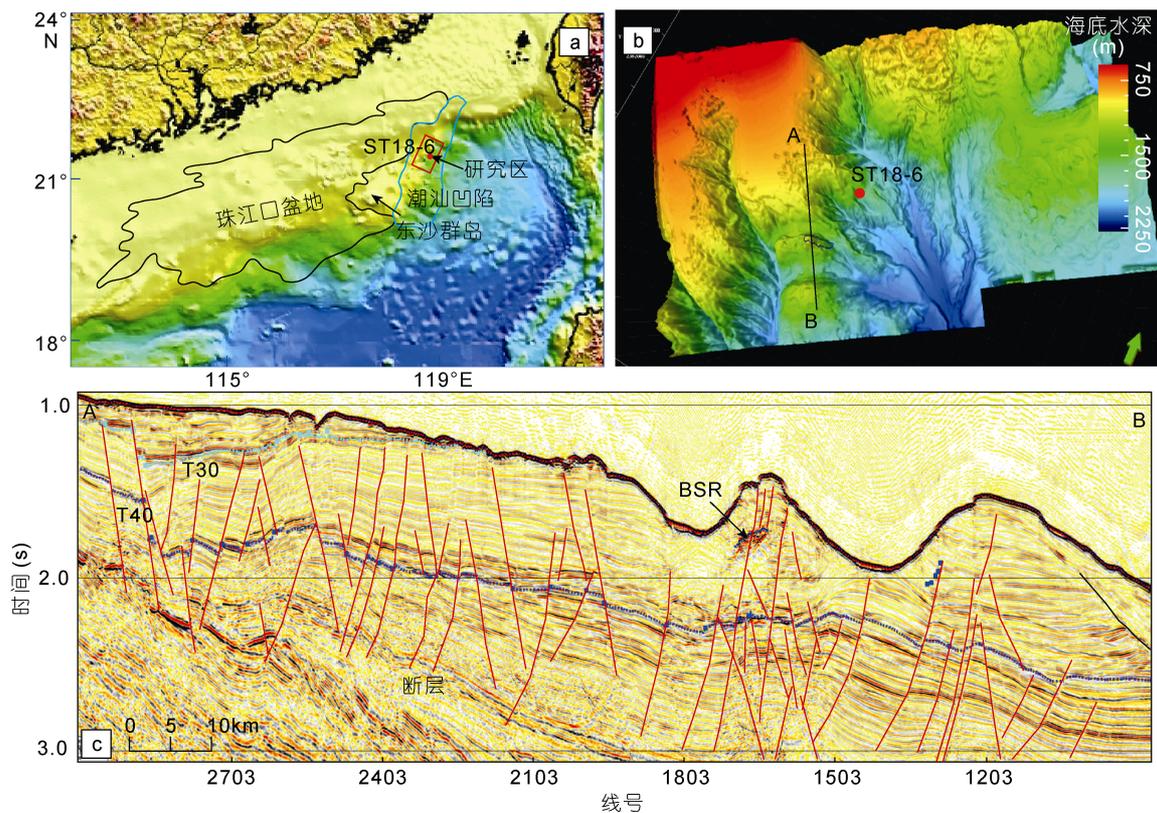


图 1 研究区揭阳凹陷位置(a)、海底地形(b)以及解释典型地震剖面(c)

Fig.1 The location of Jieyang Sag in South China Sea(a), the seafloor morphology of the study area (b) and the interpreted seismic profile(c)

注: BSR: 似海底反射; T30: 13.8Ma; T40: 16Ma; 图 c 中地震剖面方向 A 和 B 见图 b

2 高精度网格层析速度反演

研究区目前无油气钻井与水合物钻井可供利用, 而稳定带上部存在速度异常是识别水合物一种重要

属性异常。因此, 除了通过对资料重新处理(如噪音去除、多次波衰减和地震成像等常规处理)外, 为了获得更准确的速度场, 本文对成像道集净化和高精度网格层析速度反演。

2.1 τ -p 域成像道集净化

成像道集的质量通常受资料信噪比、多次波及静校正等因素影响,如何提高成像道集的质量决定了剩余延迟(residual moveout, RMO)的精度,也决定了速度反演的精度。利用 τ -p 域成像道集净化对叠前道集进行了处理,不仅能压制多次波还有效提高了道集的信噪比,在成像道集净化的同时还保持了由于速度影响造成的有效反射同相轴的剩余延迟信息,形成基于运动学原理进行道集净化方法。净化后的道集较好压制了剩余多次波,并有效提高了资料的信噪比,利于更精确的 RMO 拾取,为层析反演提供高质量道集资料。

2.2 高精度网格层析速度反演

研究区海底崎岖起伏大,断裂系统发育,由于海底侵蚀作用影响,浅部地层仅在西北部地区发育,大部分地区缺失,局部区域可发现特征较为明显

BSR(图 1c)。本研究通过高精度网格层析反演获得高分辨率浅层速度异常,同时兼顾中深部地层反射,提高断裂发育区成像效果。通过深度偏移成像道集中同相轴的 RMO 进行层析成像反演来优化速度模型。在速度反演过程中采用从浅部至深部,从大尺度到小尺度的多次迭代优化方法。主要包括以下步骤(图 2):

- (1) 利用叠前时间偏移的速度场和年代地层框架模型建立初始的速度场,使用精确的初始速度模型提高迭代效率,确保速度的合理性;
- (2) 在初始速度基础上开展目标区叠前深度偏移处理,自动拾取剩余深度差并进行高精度网格点层析速度反演,迭代更新速度场,获取精细层速度。
- (3) 经多次迭代,针对浅层进一步优化速度提高速度细节,最终获得研究区高精度速度场信息,利用该速度进行偏移成像。

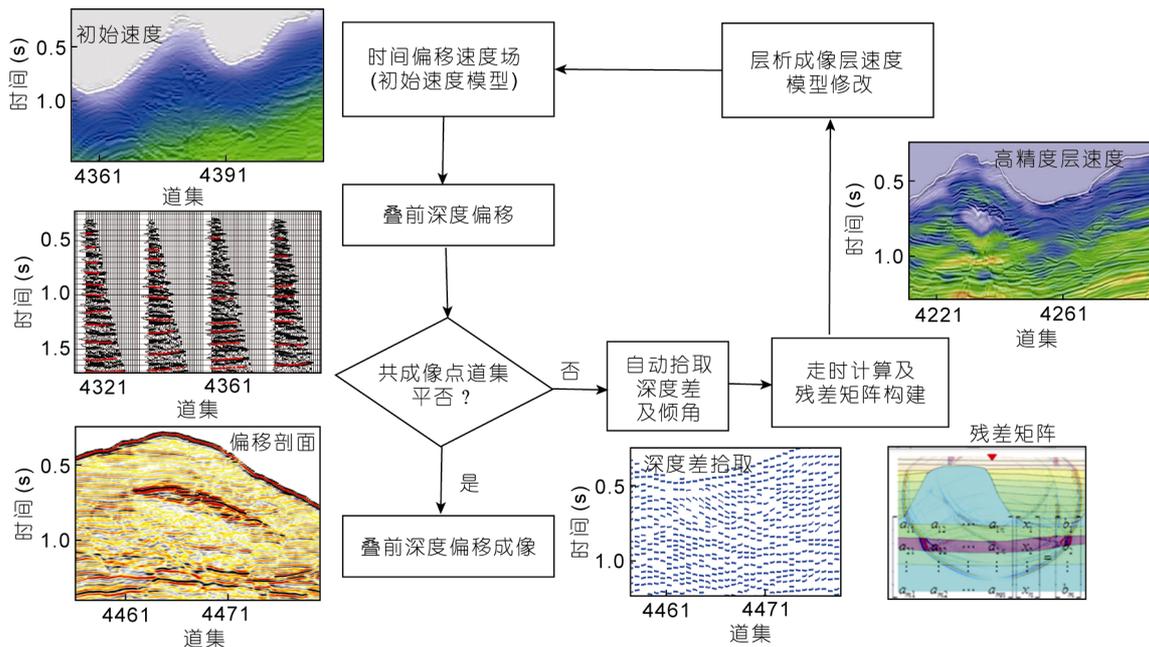


图 2 高精度网格层析速度反演流程

Fig.2 The workflow of velocity inversion of high resolution grid-based tomography

通过多次迭代,获得研究区高精度网格点层析速度反演的速度场(图 3)。从该图看,浅层速度场在解释的 BSR 上部出现高速度异常,速度达 2.0km/s,在 BSR 下部出现低速度异常,速度约为 1.6km/s。利用该速度场进行叠前时间偏移成像,从地震剖面看,BSR 上部地层出现局部强振幅反射,BSR 下部出现局部振幅增强。局部发育断层,BSR 下部地层成像明显改善,尽管地震反射呈弱振幅,但是横向呈连续反射,

表明 BSR 下部局部存在游离气。

3 含天然气水合物层地震异常特征分析

3.1 BSR 反射特征分布

利用时间偏移地震资料,发现研究区 BSR 主要分布于两条峡谷中间的脊部地层中,从地震剖面看,脊部两侧地层受到明显侵蚀作用,造成 T30 以来地层的局部缺失(图 1b, c)。根据 BSR 的地震反射特征,该

区域 BSR 呈两类(图 4)反射特征: 连续 BSR (continuous BSR, CBSR)和不连续 BSR(discontinuous BSR, DBSR)。CBSR 在地震剖面上呈连续、强反射特征, BSR 上部出现局部强反射且与地层近似平行(图 4a), BSR 下部亮点反射沿地层展布, 终止在 BSR 之上, 位于地层构造高点之上, 即水道脊的顶部。DBSR 分布在峡谷侵蚀侧翼, 地层被峡谷侵蚀, BSR 与地层呈明显的斜交关系, 强振幅与弱振幅交互出现, 下部亮点反射终止在 BSR 处(图 4a), 在 CBSR 上方存在与海底极性一致的强反射, 可能指示相对高饱和度水合物层发育(图 4a)。

通过对研究区三维地震资料精细解释, 发现该区域 BSR 发育在一个多期次叠置水道上(图 4a), 该水道主要分为四期(图 4b—e), 不同期次水道的水合物平面分布特征相似, 呈北东-南西走向, BSR 主要分布在水道中部, 横跨水道(图 4)。从该区域解释层位看, BSR 位于 T40 到 T30(16—10.5Ma), 该层为韩江组地层(图 1c), 该时期是一个稳定的海相沉积, 海底侵蚀目标区位于 T30 之上地层。因此, 与珠江口盆地相比, 该研究区 BSR 位于相对较老地层, 从反演速度剖面看, 速度背景高于珠江口盆地饱和水地层速度(1.65km/s), 表明揭阳凹陷地层的压实固结程度可能较高。

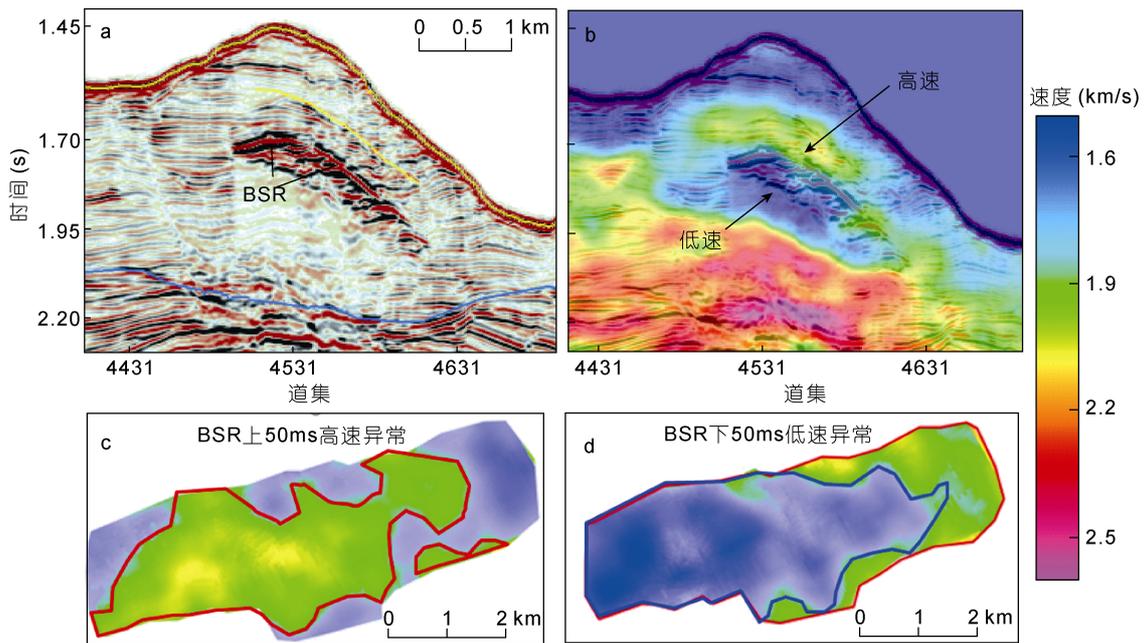


图 3 研究区典型测线 BSR 位置地震剖面(a)和高密度分析层速度(b)及其 BSR 上部 50ms 高速异常(c)和 BSR 下方 50ms 低速异常(d)分布区

Fig.3 The seismic profile showing BSR in the study area (a), the interval velocity from grid-based tomography velocity inversion (b), high velocity anomalies zone above BSR with a time window 50 ms (c); and low velocity anomalies zone below BSR with a time window 50 ms (d)

注: 红色实线: 反演速度圈定的高速异常范围; 蓝色实线: 反演速度圈定的低速异常范围

3.2 属性异常分析

与不含水合物地层相比, 稳定带底界下部的地层可能含游离气, 也可能为饱和水地层, 均呈现“上部高速、下部低速”异常特征, 在地震剖面上均产生 BSR。根据全区高精度网格层析反演后的层速度, 发现研究区 BSR 上方为高纵波速度异常, BSR 下方局部出现低纵波速度异常(图 3)。

由于目标区没有测井资料, 为了验证高密度网格层析反演的纵波速度是否合理。本文同时利用叠后

反演纵波阻抗识别水合物层。我们利用地震处理获得低频速度(4Hz 以下)建立低频趋势模型, 进行约束稀疏脉冲反演, 获得含水合物的波阻抗剖面(图 5)。在 BSR 附近的地震资料中提取振幅子波(图 5b), 进行约束稀疏脉冲反演。为了获得比较合理反演结果, 通过选择合适的子波比例因子, 来调整反演阻抗的高值异常大小, 其中子波比例因子为 4.0 时, 反演波阻抗剖面与地震异常吻合较好(图 5c)。从图 5 可以看出, 在 BSR 上方存在连续的高波阻抗值, 而在 BSR 下方

存在有低波阻抗区。从反演的波阻抗与纵波速度看, 该区域BSR上方均为高值异常, 下方为低值异常, 表

明BSR上方含水合物, 而下方含游离气层, 表明该区域是天然气水合物有利发育区。

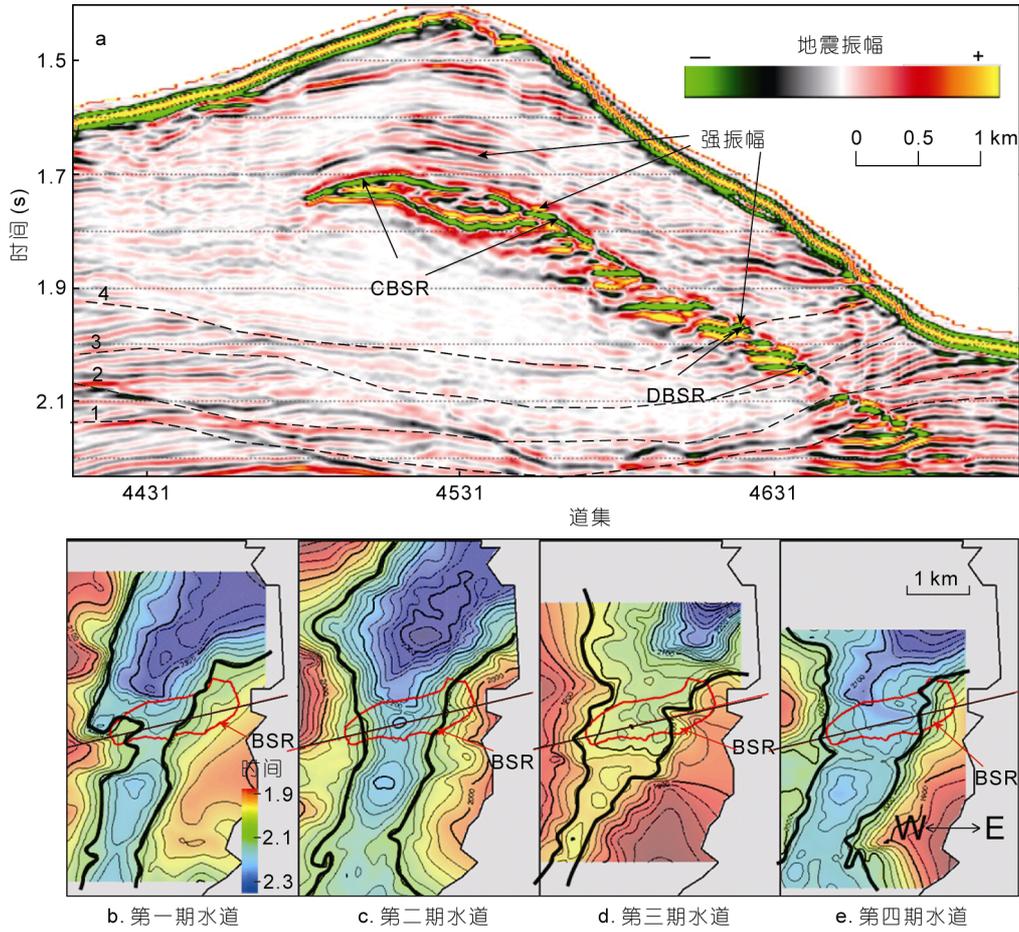
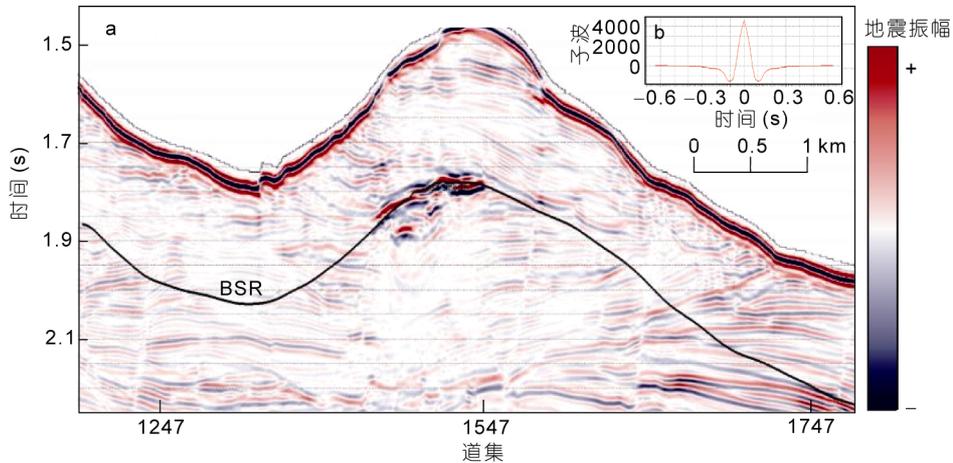


图4 研究区BSR发育特征和解释四期水道(a)以及多期次水道平面展布(b—e)

Fig.4 The distribution and characteristics of BSR and the interpreted channel (a); and the distribution characteristics of multi-stage channel in plane view (b-e)

注: CBSR: 连续BSR; DBSR: 不连续BSR; a中黑色虚线: 追踪的四个期次水道层位; b—e中黑色实线: 识别的水道发育边界; b—e中红色实线: 识别的BSR范围; e中W: 西, E: 东



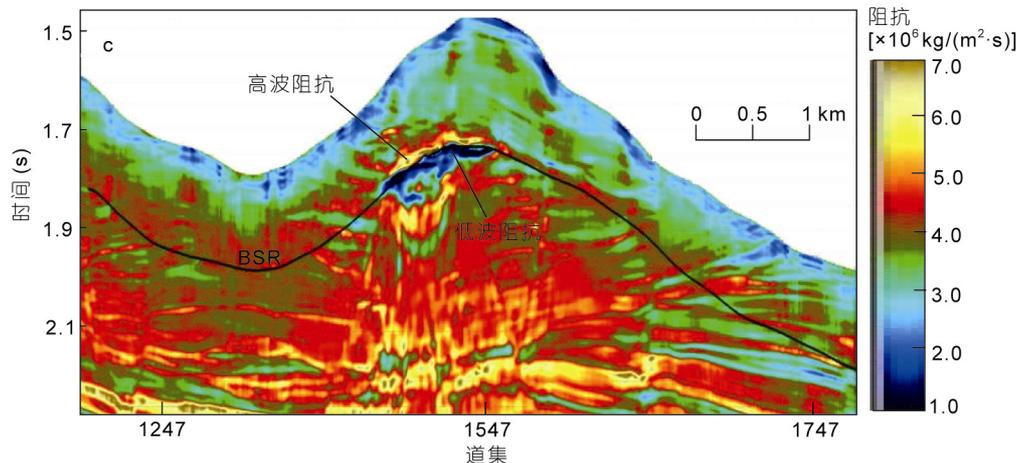


图 5 地震剖面(a)及其振幅子波(b)、约束稀疏脉冲反演纵波波阻抗剖面(c)

Fig.5 Seismic profile (a) and amplitude wavelet (b); and the inverted acoustic impedance from constrained sparse spike inversion (c)

3.3 天然气水合物空间分布

由于受构造活动影响, 研究区正断层相对比较发育, 说明该地区整体位于构造拉张环境下。由于受侵蚀作用, 大量断层到达海底(图 6a), 局部断层切穿 BSR。研究区局部发育了气烟囱构造, 在地震剖面上呈弱反射或杂乱反射特征(图 6a), 在地震相干剖面上为低相干。在 BSR 上方发育比较明显的连续反射界面, BSR 上方有明显高速度、高波阻抗异常, 推测为水合物发育层段顶面, 主要分布在 BSR 发育区构造较高部位。BSR 下方表现出明显的低速度与低波阻抗异常, 比周边正常地层速度明显偏低, 高速度异常与低速度异常在垂向上对应关系良好(图 5c)。

为了研究水合物平面分布特征, 我们利用研究区深部油气钻探 ST18-6 井(位置见图 1), 地温梯度 $45^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 海底温度 4°C 计算研究区天然气水合物稳定带底界深度, 再结合反演纵波速度, 计算稳定带底界双程走时, 沿稳定带底界一定时窗内提取不同属性, 研究水合物空间分布。相干属性是识别断层与沉积环境变化的有效属性参数, 本文利用 Petrel 软件提取三维地震数据相干属性, 沿稳定带底界 30ms 时窗提取该层的相干属性。从该相干属性看, BSR 周围及内部断层发育密集(图 6b), 表明正断层构造是该区域水合物成藏的重要条件。同时沿水合物稳定带底界提取反射地震的均方根振幅(RMS)和波阻抗的最大振幅值来反映水合物的岩性与异常空间分布(图 6), 反演波阻抗高值异常约为 50ms(图 5c), 我们沿稳定带底界上方 50ms 提取 RMS 振幅(图 6c)和波阻抗的最大

值(图 6d)。从该图看, 异常分布区与识别 BSR 吻合较好, 在识别 BSR 范围外局部区域存在最大波阻抗异常, 该异常可能与水合物有关, 也可能是地层沉积异常造成的。为了进一步判别该异常, 利用稳定带底界上方 50ms 与下方 30ms 时窗内的波阻抗差异计算稳定带附近的反射系数, 来反映稳定带附近上下地层速度异常。从计算反射系数看, 在 BSR 发育区, 若计算的反射系数为负值异常区(图 6e), 表明下伏地层与上覆地层阻抗差较大。

因此, 根据识别 BSR、反演纵波速度与波阻抗和反射系数异常及气体运移通道的综合分析及平面展布特征, 通过平面多个属性叠合分析, 认为本研究区识别 BSR 是由地层含有水合物造成的反射异常, 该研究区是一个潜在的有利于水合物成藏区域。

4 结论

揭阳凹陷位于珠江口盆地东部海域, 由于受东沙隆起影响, 发育了多个海底峡谷, 且断裂与断层较发育, 具备形成水合物的构造与沉积条件, 受研究资料限制, 该区域天然气水合物研究一直未取得突破。通过对该区域新采集三维地震资料, 开展高精度网格层析速度反演与叠前时间偏移成像处理, 发现了该凹陷指示水合物赋存的 BSR 反射。该 BSR 与地层斜交、与海底极性相反, BSR 上出现的局部强振幅反射为水合物识别标志, 而 BSR 下呈杂乱与下拉反射异常是游离气地球物理识别标志。由于受侵蚀影响, BSR 呈不同反射特征, 脊部发育 BSR 呈连续, 而峡谷

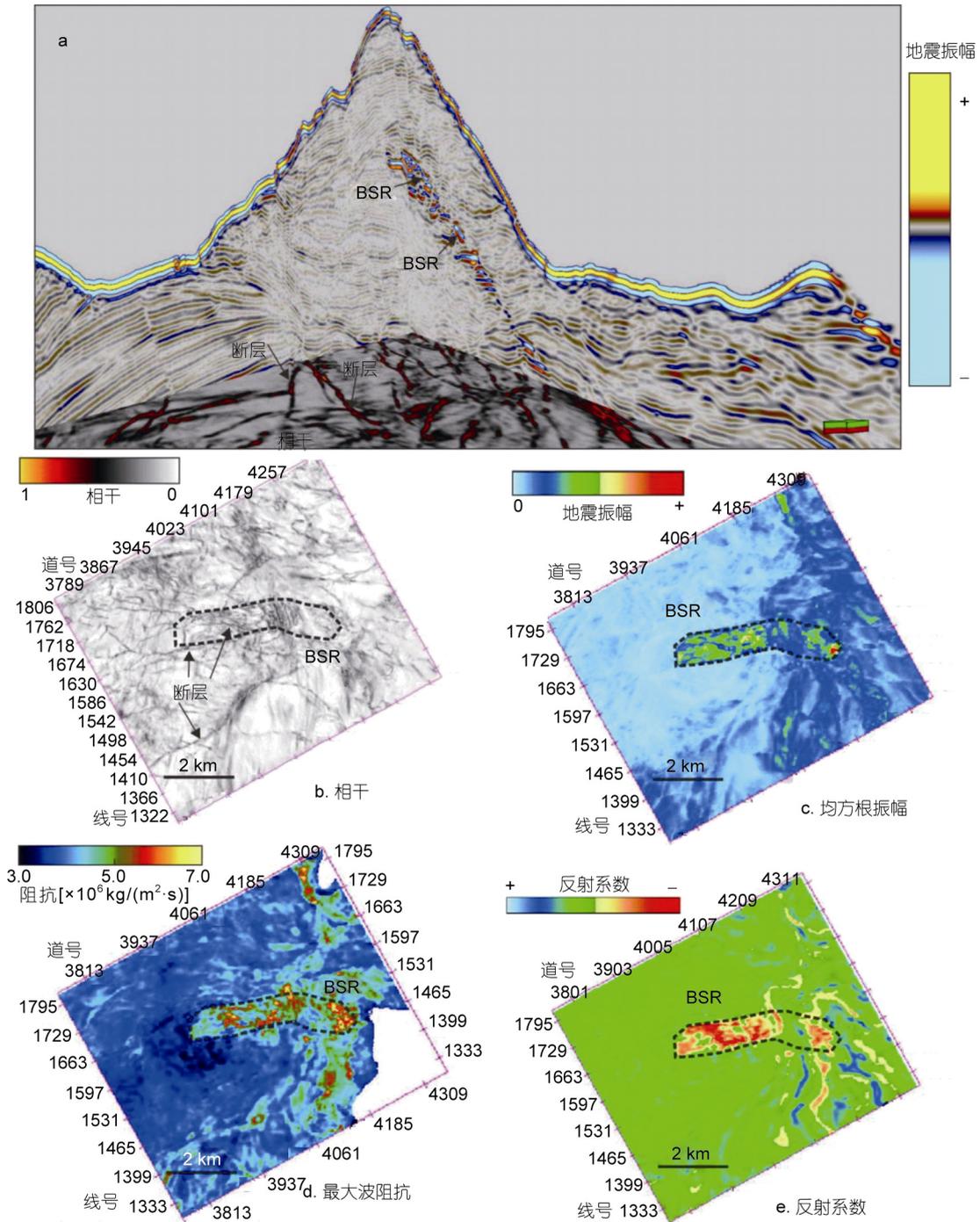


图 6 研究区典型地震剖面(a)与沿稳定带底界提取的相干(b), 均方根振幅(c), 最大波阻抗(d), 反射系数(e)属性

Fig.6 The seismic profile (a) the coherence extracted along BGHSZ (b), root-mean-square amplitude extracted along base of gas hydrate stability zone (BGHSZ) with a time window of 50 ms (c), the maximum acoustic impedance extracted along BGHSZ with a time window of 50 ms (d), and the coefficient reflection along the base of gas hydrate stability zone(e)

侧壁处 BSR 呈不连续分布特征。结合反演的高精度层速度、约束稀疏脉冲反演的纵波阻抗, 发现 BSR 上部为高值异常, 而下部出现低值异常, 表明该 BSR 是由于地层含有天然气水合物而形成的地球物理属性异常。利用三维地震资料, 基于区域天然气水合物

稳定带底界, 通过提取振幅、速度、波阻抗、反射系数和相干等属性, 发现了该区域属性异常与 BSR 分布具有非常好相关性。广泛发育的高角度断裂为深部流体向上运移提供通道, 而发育多期次继承性水道为水合物形成提供相对较好储层条件。

参 考 文 献

- 王秀娟, 钱 进, Myung L, 2017. 天然气水合物和游离气饱和度评价方法及其在南海北部的应用. 海洋地质与第四纪地质, 37(5): 35—47
- 刘 涛, 2019. 珠江口盆地东南部揭阳凹陷 A 区油气地质条件及勘探前景. 海洋地质前沿, 35(6): 39—45
- 刘学伟, 李敏锋, 张聿文等, 2005. 天然气水合物地震响应研究——中国南海 HD152 测线应用实例. 现代地质, 19(1): 33—38
- 吴晓川, 蒲仁海, 薛怀艳等, 2019. 珠江口盆地揭阳凹陷珠海组海底扇含气性检测与分析. 地球物理学报, 62(7): 2732—2747
- 吴能友, 张海敞, 杨胜雄等, 2007. 南海神狐海域天然气水合物成藏系统初探. 天然气工业, 27(9): 1—6
- 宋海斌, 松林修, 吴能友等, 2001. 海洋天然气水合物的地球物理研究(I): 岩石物性. 地球物理学进展, 16(2): 118—126
- 张光学, 张 明, 杨胜雄等, 2011. 海洋天然气水合物地震检测技术及其应用. 海洋地质与第四纪地质, 31(4): 51—58
- 陈多福, 冯 东, 陈光谦等, 2005. 海底天然气渗漏系统演化特征及对形成水合物的影响. 沉积学报, 23(2): 323—328
- 栾锡武, 张 亮, 岳保静, 2010. 南海北部陆坡海底火山活动对天然气水合物成藏的影响. 现代地质, 24(3): 424—432
- 阎 贫, 陈多福, 2009. 南海北部白云凹陷渗漏型天然气水合物地球物理证据. 热带海洋学报, 28(3): 85
- 赵淑娟, 吴时国, 施和生, 等, 2012. 南海北部东沙运动的构造特征及动力学机制探讨. 地球物理学进展, 27(3): 1008—1019
- Li J F, Ye J L, Qin X W *et al*, 2018. The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea. *China Geology*, 1(1): 5—16
- Li C F, Zhou Z Y, Hao H J *et al*, 2008. Late Mesozoic tectonic structure and evolution along the present-day northeastern South China Sea continental margin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(4—6): 546—561
- Lin C C, Lin A T S, Liu C S *et al*, 2009. Geological controls on BSR occurrences in the incipient arc-continent collision zone off southwest Taiwan. *Marine and Petroleum Geology*, 26(7): 1118—1131
- Liu C S, Schnürle P, Wang Y S *et al*, 2006. Distribution and characters of gas hydrate offshore of southwestern Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 17(4): 615—644
- Lüdmann T, Wong H K, 1999. Neotectonic regime on the passive continental margin of the northern South China Sea. *Tectonophysics*, 311(1—4): 113—138
- Qian J, Wang X J, Collett T S *et al*, 2018. Downhole log evidence for the coexistence of structure II gas hydrate and free gas below the bottom simulating reflector in the South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 98: 662—674
- Sha Z B, Liang J Q, Zhang G X *et al*, 2015. A seepage gas hydrate system in northern South China Sea: seismic and well log interpretations. *Marine Geology*, 366: 69—78
- Sloan E D, 1998. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. 2nd edn. New York: Marcel Dekker
- Sloan E D, Koh C A, 2008. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press
- Wang X J, Hutchinson D R, Wu S G *et al*, 2011. Elevated gas hydrate saturation within silt and silty clay sediments in the Shenhu area, South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B5): B05102
- Yan P, Deng H, Liu H L, 2006. The geological structure and prospect of gas hydrate over the Dongsha Slope, South China Sea. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 17(4): 645—658
- Yan P, Wang L L, Wang Y L, 2014. Late Mesozoic compressional folds in Dongsha Waters, the northern margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 615—616: 213—223
- Yang S X, Liang J Q, Lei Y *et al*, 2017. GMGS4 gas hydrate drilling expedition in the South China Sea. *Fire in the Ice*, 27(1): 7—11
- Zhang G X, Liang J Q, Lu J A *et al*, 2015. Geological features, controlling factors and potential prospects of the gas hydrate occurrence in the east part of the Pearl River Mouth Basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 67: 356—367

SEISMIC ANOMALIES OF GAS HYDRATE-BEARING SEDIMENTS IN THE JIEYANG SAG, NORTHERN SLOPE OF SOUTH CHINA SEA

LI Jie^{1,2}, HE Min^{1,2}, YAN Cheng-Zhi^{1,2}, LI Yuan-Ping^{1,2}, JIN Jia-Peng³

(1. CNOOC China Limited, Shenzhen Branch, Shenzhen 518054, China; 2. CNOOC Deepwater Development Ltd., Shenzhen 518054, China; 3. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract A large number of studies show that the Zhujiang (Pearl) River Mouth Basin in the north of the South China Sea is a gas hydrate development area, but studies on the hydrate in the Jieyang Sag in the east of the basin are few. In this study, using the newly acquired three-dimensional seismic data of Jieyang Sag, the imaged gathers optimization and pre-stack time migration processing were carried out for the three-dimensional seismic data, and the interval velocity cube was obtained by high-resolution grid tomographic inversion. Using the data to perform post-stack constrained sparse spike inversion, the acoustic impedance anomaly of gas hydrate formation was acquired, and the hydrate was identified by comprehensive analysis of inversion and seismic attributes. According to the newly processed seismic data, BSR reflection in this area was characterized by continuity, discontinuity, and cross-bedding. BSR was developed on an inherited small channel, and faults and gas chimneys were developed below. Based on the analysis of the characteristics of BSR and the anomalies of velocity, wave impedance, amplitude, frequency, coherence, and other attributes of the upper and lower strata of BSR, combined with the conditions of hydrate accumulation, a new favorable gas hydrate accumulation area in the north of South China Sea was found, which provides the basis for hydrate exploration in this area.

Key words gas hydrate; Jieyang Sag; seismic inversion; gas hydrate accumulation