

doi:10.3799/dqkx.2012.S1.020

# 利用多道地震反射数据探测神狐海域渗漏型水合物

徐华宁<sup>1,2</sup>, 邢涛<sup>2</sup>, 王家生<sup>1</sup>, 李丽青<sup>2</sup>, 梁蓓雯<sup>2</sup>, 舒虎<sup>2</sup>, 张明<sup>2</sup>

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 广州海洋地质调查局, 广东广州 510075

**摘要:** 以海底为基准, 将高分辨率多道地震反射数据分离为两个独立部分, 并分别对水体和地层成像。水体的成像结果显示了两个明显形如羽状流的异常, 与之对应地层的地震反射剖面显示在海底处出现海底下陷、气体溢出口等与甲烷渗漏相关的地形地貌特征, 并在海底之下不足 100 m 的深度位置出现一个指示天然气水合物存在的明显的似海底反射。详尽的速度分析发现, 似海底反射和溢出口之下沉积地层的声波速度明显下降, 并且地震反射特征也与地层含气有关。通过对所有信息综合分析, 推测这些地球物理异常和特殊地形地貌特征(如羽状流、声波速度反转、溢出口、海底下陷、浅部 BSR 等)很可能是甲烷气体沿运移通道进入近海底沉积物中形成天然气水合物或溢出至海水中所致。研究结果表明, 多道高分辨率地震反射数据具有探测渗漏型天然气水合物的能力。

**关键词:** 神狐海域; 地震反射数据; 天然气水合物; 渗漏型水合物; 地球物理。

**中图分类号:** P341

**文章编号:** 1000-2383(2012)S1-0195-08

**收稿日期:** 2011-11-25

## Detecting Seepage Hydrate Reservoir Using Multi-Channel Seismic Reflecting Data in Shenhu Area

XU Hua-ning<sup>1,2</sup>, XING Tao<sup>2</sup>, WANG Jia-sheng<sup>1</sup>, LI Li-qing<sup>2</sup>, LIANG Bei-wen<sup>2</sup>, SHU Hu<sup>2</sup>, ZHANG Ming<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China

**Abstract:** Taking the seafloor as datum, the high resolution seismic reflecting data acquired in Shenhu area are divided into two parts for the imaging of water column and strata respectively. Two apparent echoes shaped like plume show in the water column and the particular geomorphology such as vents and depressions of seafloor suggests the existence of the gas seepage occurred opposite them on the seismic reflecting section. Moreover, a classical bottom simulating reflector which indicates the presence of gas hydrates appears at the depth less than 100 m. The detailed velocity field reveals that acoustic velocity of sediments decreases beneath both the seep sites and bottom simulating reflector and the seismic reflecting characteristics seem to be related to the gas-bearing of strata. It can be concluded that geophysical anomalies (plumes, acoustic velocity reverse, BSR (bottom simulating reflector)) and the expressions of particular geomorphology of seabed (vents and depressions or craters) should have been resulted from the migration of free gas into the sediments of subsurface and then the formation of gas hydrates or the direct seepage into the seawater. This study indicates that high resolution multi-channel seismic reflecting data has great potential for characterizing the anomalies and then detecting the seepage gas hydrates reservoir.

**Key words:** Shenhu area; seismic reflecting data; gas hydrates; seepage hydrate reservoir; geophysics.

天然气水合物是由水和气体(主要为甲烷)组成的晶状化合物, 广泛分布于世界海域大陆边缘、深水湖以及陆地的永久冻土带, 它的存在对未来能源和

全球环境的影响意义重大(Lammers *et al.*, 1995; Sloan, 1998). 2007 年, 广州海洋地质调查局在中国南海神狐海域实施钻探取样, 结果表明含天然气水

**基金项目:** 国家重点基础研究计划 973 项目(Nos. 2009CB219500, 2011CB808805); 国家自然科学基金项目(No. 41172102); 国家高技术研究发展计划 863 项目(No. 2006AA09A202).

**作者简介:** 徐华宁(1973—), 男, 博士研究生, 教授级高级工程师, 主要从事天然气水合物成像与反演研究. E-mail: xuhuaning1973@163.com

合物沉积物位于海底之下 153~225 m 深度区间,形成水合物所需的游离气主要为向上运移扩散的生物成因甲烷(吴能友等,2007;吴时国等,2009;徐华宁等,2010;匡增桂和郭依群,2011). 天然气水合物稳定带主要受温度压力条件的控制,处于形成—分解—再形成—再分解的动态平衡状态,因此只要有合适的运移通道,较深部的扩散型天然气水合物分解产生的游离气将运移至海底浅表,可能再次形成渗漏型天然气水合物或渗漏至海水中(Lewis and Marshall, 1996; Suess *et al.*, 1999). 这一过程所引起的地震反射异常包括海底浅部的似海底反射(bottom simulating reflecting)、地层声波速度反转以及羽状流等;地球化学异常主要表现为近底层海水甲烷高浓度异常、沉积物中硫同位素低异常以及冷泉等;另外,与甲烷气体渗漏相关的海底地形地貌特征也被广泛关注,主要包括麻坑、气体溢出口、负地形海底下陷与正地形丘体等(Suess *et al.*, 1999; Holbrook *et al.*, 2003; Schroot *et al.*, 2005; Faure *et al.*, 2006; Hovland and Svensen, 2006; Crutchley *et al.*, 2010).

目前探测甲烷气体渗漏所形成的异常的主要技术手段包括多波束地形地貌探测、地震探测、声纳侧扫、地球化学分析与海底摄像等(陈林和宋海斌, 2005;宋海斌等,2008;尹希杰等,2008;董崇志等,2010). 国内针对甲烷渗漏活动的研究主要依据地球化学数据,但通过取样发现的地球化学异常在空间上是离散的,而地震探测方法探测覆盖面积大、获得地质信息更丰富. 此外海洋多道地震数据不仅可以获得海底之下构造成像,还可以获得水层的反射以识别气体渗漏等异常特征的存在. 本文以高分辨率地震反射数据为基础,将海洋地震学方法引入到渗漏型天然气水合物的识别,发现了海底浅部(<100 m)沉积中的 BSR、速度异常以及多种与渗漏型水合物相关的地形地貌异常特征(Anderson and Bryant, 1990; Biescas *et al.*, 2008),结果表明利用高分辨率多道地震反射数据探测甲烷气体渗漏是可行、有效的.

1 研究区地质背景

研究区位于南海北部陆坡的前端,海底地形总体趋势为由北向南倾斜,水深从 1 000 m 逐渐加深到 1 700 m 以上. 海底地貌形态复杂,主要发育海丘、海谷、冲蚀沟以及海底沟槽等地貌类型(图 1). 另

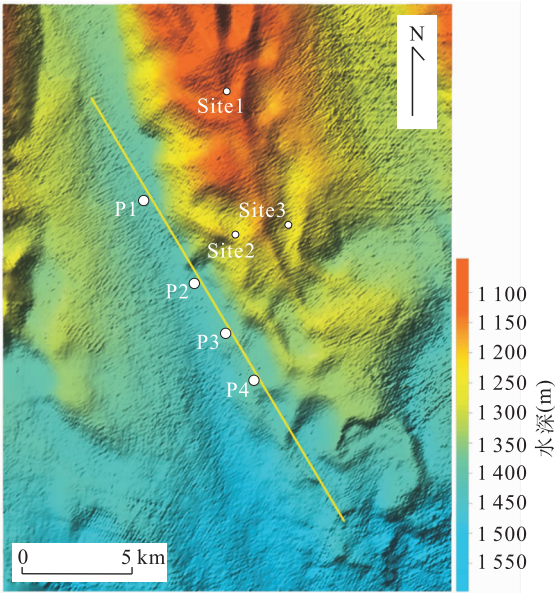


图 1 研究区地形地貌

Fig. 1 Geomorphology of study area

Site1、Site2、Site3 为钻探取样获得水合物样品位置;直线为本文研究的多道地震测线;P1、P2、P3 和 P4 为异常点位置

外,与渗漏型天然气相关的麻坑、海底塌陷以及气体溢出口等微地形地貌特征也广泛分布. 在构造方面,神狐海域是南海新构造运动较为活跃的地区,新构造运动致使断裂不断增加,诱发深部超压泥质岩类的塑性流动,从而形成泥底辟活动带,在上覆地层产生了高角度的断裂和垂向裂隙系统,构成流体渗漏的主要通道. 当富含甲烷气体发生流体垂向或侧向运移时,会在合适的温压条件下形成天然气水合物. 中中新世以来,研究区整体进入构造沉降阶段,从北向南依次为滨海—浅海—半深海—深海碎屑岩沉积,且水深逐步增大,形成了良好的天然气水合物成藏地质条件(龚再升等,2004;吴能友等,2009).

2 地震数据采集与处理

本文研究所用的多道地震数据由广州海洋地质调查局“奋斗四号”船于 2006 年 7—8 月在中国南海北部神狐海域采集完成. 野外采集参数为:最小偏移距 125 m,道间隔 12.5 m,炮间距 25 m,采样间隔 0.5 ms,记录道数为 192. 激发震源为 8 条 BOLT 枪组成的空气枪阵,总容量为 2 622 cm<sup>3</sup>,其峰值能量的频带宽度在 50~120 Hz 之间. 根据研究思路,笔者将数据分成两个独立部分进行处理:首先对海底之上的数据进行处理,获得水层的成像信息,以期发现可能存在的羽状流异常;然后对水层反射异常区

海底之下的地震反射数据进行精细处理以获得完整的地质信息.

2.1 水体反射数据成像

水体的地震成像处理流程相对简单,主要包括:  
(1)内切除. 由于水体地震反射信号振幅远远小于地层的反射振幅,因此需要将地层的反射数据切除以突出水层的反射信号;(2)8~12 Hz 的高通滤波和球面扩散增益校正;(3)线性噪音干扰压制. 水体的地震反射信号中的直达波是最主要的干扰,其能量非常强并且屏蔽了水体浅层的反射,消除线性干扰在水体成像处理中特别重要;(4)CDP 分选并选择偏移距大于 200 m 的地震道叠加,目的是减小近道直达波的影响,因为线性干扰在近偏移距中特别强且压制效果相对较差.

2.2 地层反射数据成像

在确定水体异常所在区域后,对地层的地震反射数据进行精细处理,以获得海底之下浅部地层与气体渗漏相关的更多地球物理异常特征和地质信息,主要包括气体溢出口、海底下陷、近海底的浅层BSR、近海底沉积物的速度、气体运移通道以及反射混乱带等. 海底之下浅部地层的成像处理相对复杂,主要处理流程为:(1)相对保幅前提下的线性噪音和大值干扰噪音压制;(2)子波处理以突出 BSR 的反极性(相对于海底)特征;(3)详尽的速度分析;(4)叠

前时间偏移处理以优化沉积层的接触关系,突出含气沉积物的地震反射特征并使气体运移通道系统清晰成像. 由于研究位置的水深大于1 000 m,且目标层较浅,地层的成像没有考虑多次波的压制.

3 异常特征

3.1 地形地貌及其反射特征

渗漏型天然气水合物由于埋藏很浅,其分解产生的甲烷气体将造成海底反射强度减弱并形成特殊的地形地貌,释放至水中的气体会造成水体扰动并形成羽状流等反射特征(Schroot *et al.* , 2005). 图 2 为多道反射地震数据的成像结果,包括水体反射成像剖面(图 2a)和地层反射数据成像剖面(图 2b). 很明显,在地层反射剖面上存在 4 个与天然气水合物相关的异常位置,分别以 P1、P2、P3 和 P4 标注;而水体成像剖面上可见 2 个明显的异常强反射柱体与 P2 和 P3 所在位置对应. 这一异常反射很可能与甲烷的释放有关. 图 3 为 4 个异常位置的局部放大图,发现 P1 表现为一个正地形异常的丘体,P2 和 P3 所在位置的海底存在明显的气体溢出口,而 P4 对应一个负地形异常的海底下陷且在海底之下约100 ms 处存在一个非常明显的 BSR. 这些地震反射特征以及地形地貌特征与水合物的存在或气体的释放都是

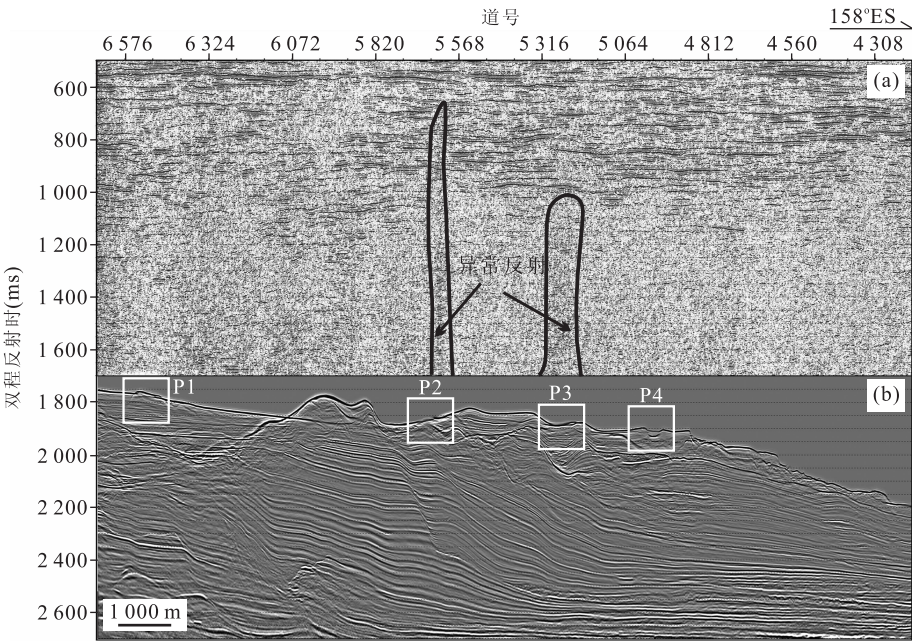


图 2 多道地震数据成像  
Fig. 2 Imaging section of multi-channel seismic reflecting data  
a. 水体反射数据成像;b. 地层反射数据成像;P1、P2、P3、P4 与图 1 中的标注对应



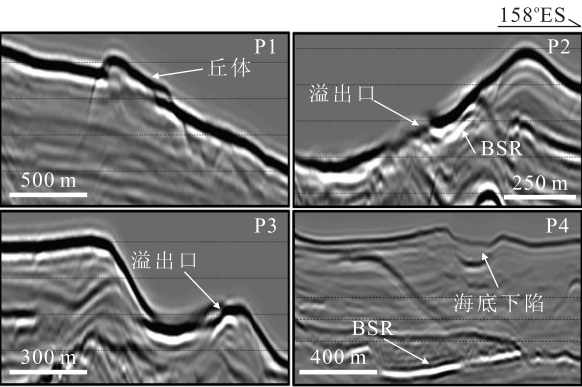


图 3 P1-P4 位置成像剖面的局部放大  
Fig. 3 Parts enlargement of imaging section at P1 to P4

密切相关的. 尤其是海底溢出口所在位置与水体反射异常所在位置具有很好的对应关系, 这样就可以初步确定气体渗漏的存在. 在 P2 所在位置的放大图上可以发现一个紧靠海底的强负极性反射, 暗示可能存在水合物, 其分解造成大量的甲烷释放致使水体出现强扰动并形成明显的羽状流; 而 P3 所在位置水体反射异常的强度相对弱, 意味着气体释放的量相对较小.

3.2 BSR 特征

气体水合物的存在将改变地层的声学属性, 其稳定带底与下覆地层的强阻抗差造成在地震反射剖面上 BSR 的出现. 图 4 为 P4 位置处地震反射数据的浅部地层成像剖面, 在 2 140~2 150 ms 之间显示了一个明显的负极性、强振幅 BSR, 且其横穿地层 (以 BSR1 标注). 根据地质解释与钻探结果确定, 出现在这一深度位置的 BSR 与钻探取样获得天然气水合物样品区域的 BSR 是一体的, 因此可以确定 BSR1 与天然气水合物的存在是对应的, 代表了深部气体扩散所形成的水合物稳定带的底界面. 在

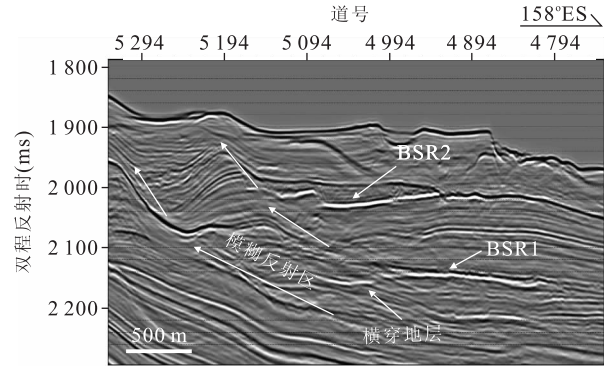


图 4 P4 位置处的 BSR 反射特征  
Fig. 4 Reflecting characteristics of BSR lying below site P4

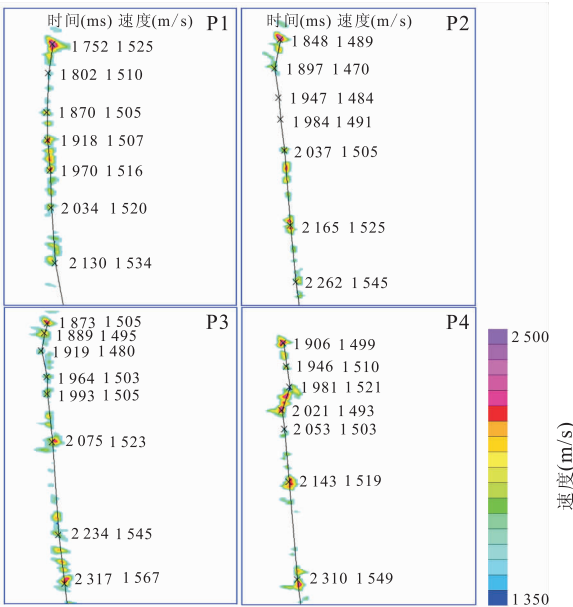


图 5 P1-P4 处的均方根速度特征  
Fig. 5 Root-mean-square velocity at P1 to P4

BSR1 反射与海底反射之间 (海底之下约 110 ms), 存在另外一个强振幅的负极性反射 (以 BSR2 标注), 其形态与海底也大致平行, 而 BSR1 与 BSR2 之间的模糊反射带则表明了气体的存在. 由于 2 个 BSR 所处深度都符合天然气水合物稳定存在的温压条件, 因此仅根据地震反射特征是难以确定 BSR2 是代表渗漏型天然气水合物稳定带的底界面还是渗漏气体的顶界面, 需要更多的信息综合分析, 但 BSR2 的形成与气体的渗漏肯定存在相关性. 另外, 在海底之下不足 100 m 的深度位置, 未固结的松散沉积物很难将大量的游离气圈闭、聚集并在地震剖面上产生一个连续的强反射, 因此 BSR2 很可能是浅层的渗漏型水合物稳定带的底界面.

3.3 速度异常特征

不论是游离气还是天然气水合物, 证明其存在的最直接的地球物理证据就是地层的声波速度. 由于海底沉积物中的游离气会明显降低地层声波速度和地层密度, 渗漏处海底及浅层通常具有异常的反射率, 尤其是在未固结沉积区域, 海底阻抗很可能低于水体阻抗致使海底出现负阻抗 (Domenico, 1977; Priest *et al.*, 2006). 为确定 4 个地形地貌特征是否与气体渗漏或天然气水合物的存在相关, 在对多道地震反射数据精细处理的基础上进行详尽的速度分析. 图 5 为 4 个异常位置处的均方根速度谱, 图中的数值为时间速度对 (时间单位为 ms, 速度单位为 m/s). P1 处的海底速度较高, 达到 1 525 m/s, 海底

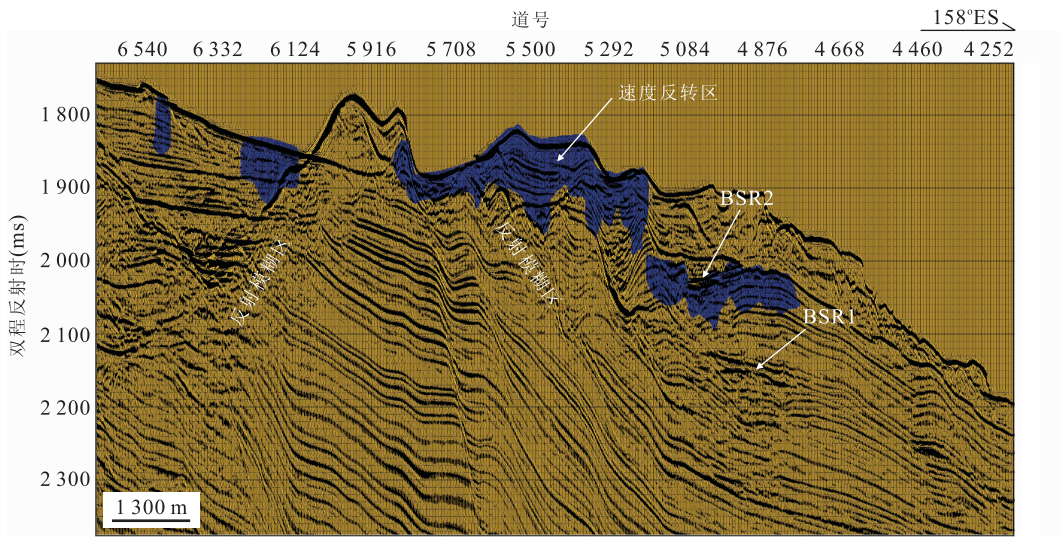


图6 速度垂向变化归一化结果与地震反射剖面叠合(蓝色区域表明速度垂向反转)

Fig. 6 Normalized vertical gradient of RMS velocity field superposed on seismic reflecting section

蓝色区域表示速度出现反转,可能代表游离气聚集的区域;黄色区域表示速度随深度是增加

之下的浅层速度存在一定的下降,但幅度较小,速度的垂向趋势符合研究区沉积物速度场的整体规律.据这一速度特征可以推测,P1处的丘体可能是一个碳酸盐岩礁体,可能与过去的气体渗漏和生物活动有关;P2位置的速度特征表明气体的渗漏活动强烈,海底的速度较低并且海底之下出现明显的速度负异常,可能与流体的高通量有关;P3处的速度特征整体上与P2一致,但其海底的速度比较正常,表明此处存在气体聚集但渗漏活动相对较弱,这与水体的异常反射特征也是一致的;P4处的海底速度略微偏小.自海底之下的75 ms之内,速度由1 499 m/s上升到1 521 m/s,上升速率较一般沉积物快.速度异常最明显的时段出现在1 981~2 021 ms之间,由1 521 m/s急剧下降到1 493 m/s,速度下降的时间位置与BSR2正好对应,进一步表明BSR2很可能代表了浅层渗漏型水合物的底界面,且BSR2之下存在游离气.BSR1(2 143 ms处)上下的速度并没有表现出明显的速度异常特征,这可能与此位置处于水合物分布区边缘导致水合物饱和度不高有关,而地层速度在BSR1之下没有明显下降,与钻探取样在水合物稳定带之下没有发现游离气也是吻合的.

为了更直观地表现速度的垂向变化规律,并考虑速度异常的横向分布特征,将均方根速度场的垂向变化量归一化结果与地震反射剖面叠合,如图6所示.图6表达的地质意义与图5的分析结果是一致的,并将速度的垂向异常特征中的横向分布特征更清楚地显示出来.

4 讨论

气体渗漏以及渗漏型天然气水合物的形成会造成水体反射出现反射异常,利用高频(3.5 kHz)地震探测方法可以观察到明显柱状或双曲状的羽状流(Sassen *et al.*, 2001).尽管在海底或近海底之下产生的一些特殊的地形地貌特征(如麻坑、海底塌陷、丘体等)在不同频率的地震剖面上表现会存在一定的差异,但在常规多道地震反射剖面上还是会出现声浑浊、空白带、增强反射体、亮点以及浅部气烟囱等特征(Satyavani *et al.*, 2005; Wood *et al.*, 2008).图7为研究区多道地震反射数据的成像剖面,结果表明利用高分辨多道地震反射数据也可以探测到这些与气体渗漏相关的反射特征.甲烷气体在渗漏过程中很可能伴有浅层天然气水合物的形成,这一过程的关键在于浅部是否存在合适的运移通道(Gay *et al.*, 2007; Cook *et al.*, 2008).图7的地震反射特征表明,游离气体的存在使地震剖面上出现反射模糊区,其边界基本与断层方向一致,这也说明浅部的断层为甲烷的向上运移提供了运移通道.另外,速度场异常特征也说明游离气在近海底和BSR2之下聚集,为浅部渗漏型水合物的形成提供了足够的气源.应当指出的是,由于地形的剧烈变化以及地震数据分辨率和速度拾取误差的限制,不是所有的速度异常都对应真正的地质异常,只有垂向上的速度异常特征明显、横向上具有一定的分布规模并且符合地质规律的异常才具有较高的可信度.



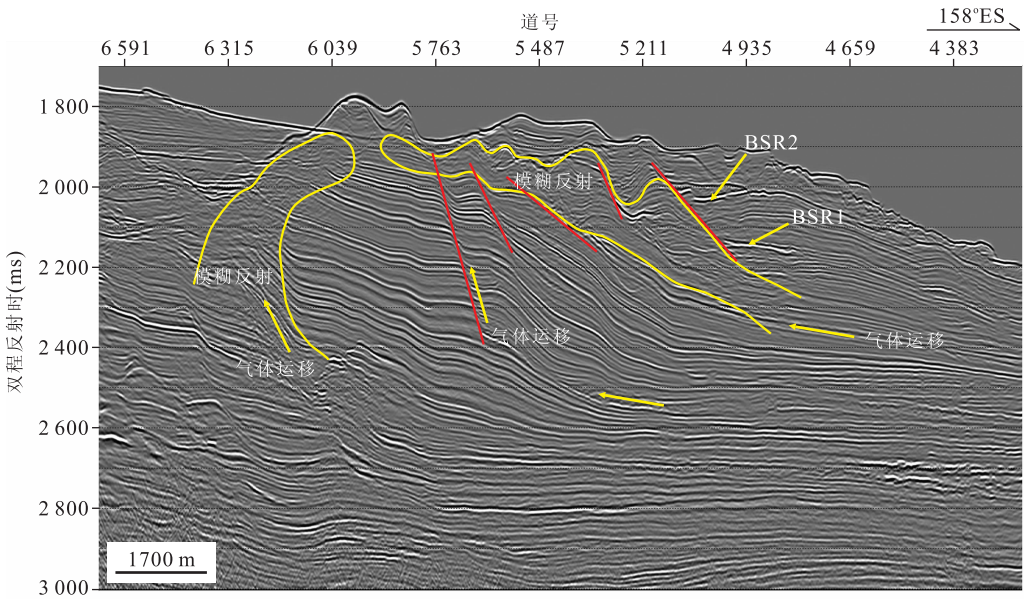


图 7 研究测线地震反射特征  
Fig. 7 Seismic reflecting characteristics of imaging section

5 结论

目前国内天然气水合物地震研究的重点在于探测扩散型天然气水合物. 尽管这一区域的多波束地形地貌测量和地球化学取样探测到很多与渗漏相关的异常,但这些异常特征更多用于气体渗漏的识别,没有与近海底浅部的渗漏型天然气水合物识别建立关联. 一方面是由于非地震方法获得的数据本身具有局限性,难以与浅层的地质信息进行综合分析;另一方面是由于近海底处的地震成像精度受地质条件与成像方法(尤其是速度分析精度)的影响很大,使得与天然气水合物相关的地震反射特征不具典型性甚至被忽略. 图 7 中的 BSR1 明显横穿地层,但 BSR2 所在深度的地层由更松散未固结沉积物组成,因此在多道地震反射剖面上很难表现出横穿地层的特征.

研究结果表明,首先利用高分辨多道地震数据的水体成像初步确定存在甲烷气体渗漏的异常反射区域,然后将异常区域的多道地震反射数据对沉积地层进行精细成像,这一研究思路能够快速探测可能存在于近海底处的渗漏型水合物. 基于这一思路的地层成像结果发现了近海底浅层(<100 m)BSR 以及速度场异常特征的存在,初步给出了渗漏型天然气水合物存在的地球物理证据. 将研究区地形地貌特征以及地层的地震反射特征综合分析,可以确定浅部断层为游离气的运移及渗漏型天然气水合物

的形成提供了良好的运移通道,从而进一步证实渗漏型水合物存在的可能性. 更重要的是,这一研究发现将拓展我国海域天然气水合物的探测思路,有助于完善对我国海域天然气水合物空间分布特征的认识和建立天然气水合物的立体分布模式,进而为天然气水合物资源量准确评价提供依据.

致谢:感谢广州海洋地质调查局杨胜雄教授、梁金强教授、陆敬安教授和刘坚教授在研究中给予的帮助和支持,特别感谢广州海洋地质调查局关永贤教授提供了多波束资料,保证了研究的顺利进行.

References

Anderson, A. L. , Bryant, W. R. , 1990. Gassy sediment occurrence and properties—northern Gulf of Mexico. *Geo-Marine Letters*, 10 (4): 209 — 220. doi: 10. 1007/BF02431067

Biescas, B. , Sallarès, V. , Pelegrí, J. L. , et al. , 2008. Imaging meddy finestructure using multichannel seismic reflection data. *Geophysical Research Letters*, 35: L11609. doi:10. 1029/2008GL033971

Chen, L. , Song, H. B. , 2005. Geophysical features and identification of natural gas seepage in marine environment. *Progress in Geophysics*, 20(4): 1067—1073 (in Chinese with English abstract).

Crutchley, G. J. , Pecher, I. A. , Gorman, A. R. , et al. , 2010. Seismic imaging of gas conduits beneath seafloor seep sites in a shallow marine gas hydrate province, Hikurangi Margin, New Zealand. *Marine Geology*, 272

- (1—4); 114—126. doi:10.1016/j.margeo.2009.03.007
- Cook, A. E., Goldberg, D., Kleinberg, R. L., 2008. Fracture-controlled gas hydrate systems in the northern Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 25(9): 932—941. doi:10.1016/j.marpetgeo.2008.01.013
- Domenico, S. N., 1977. Elastic properties of unconsolidated porous sand reservoirs. *Geophysics*, 42(7): 1339—1368. doi:10.1190/1.1440797
- Dong, C. Z., Song, H. B., Bai, Y., et al., 2010. The latest development of seismic oceanography. *Progress in Geophysics*, 25(1): 109—123 (in Chinese with English abstract).
- Faure, K., Greinert, J., Pecher, L. A., et al., 2006. Methane seepage and its relation to slumping and gas hydrate at the Hikurangi margin, New Zealand. *NZJ. Geol. Geophys.*, 49(4): 503—516. doi:10.1080/00288306.2006.9515184
- Gay, A., Lopez, M., Berndt, C., et al., 2007. Geological controls on focused fluid flow associated with seafloor seeps in the Lower Congo basin. *Marine Geology*, 244(1—4): 68—92. doi:10.1016/j.margeo.2007.06.003
- Gong, Z. S., Li, S. T., Wang, J. Y., et al., 2004. Dynamic Research of oil and gas accumulation in northern marginal basin of South China Sea. Science Press, Beijing, 339 (in Chinese).
- Holbrook, W. S., Páramo, P., Pearse, S., et al., 2003. Thermohaline fine structure in an oceanographic front from seismic reflection profiling. *Science*, 301(5634): 821—824. doi:10.1126/science.1085116
- Hovland, M., Svensen, H., 2006. Submarine pingoes: indicators of shallow gas hydrates in a pockmark at Nyegga, Norwegian Sea. *Marine Geology*, 228(1—4): 15—23. doi:10.1016/j.margeo.2005.12.005
- Kuang, Z. G., Guo, Y. Q., 2011. The sedimentary facies and gas hydrate accumulation model since Neogene of Shenhu Sea area, Northern South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(5): 914—920 (in Chinese with English abstract).
- Lammers, S., Suess, E., Hovland, M., 1995. A large methane plume east of Bear Island (Barents Sea): implications for the marine methane cycle. *Geol. Rundsch.*, 84(1): 59—66. doi:10.1007/BF00192242
- Lewis, K. B., Marshall, B. A., 1996. Seep faunas and other indicators of methane-rich dewatering on New Zealand convergent margins. *NZJ. Geol. Geophys.*, 39(2): 181—200. doi:10.1080/00288306.1996.9514704
- Priest, J. A., Best, A. I., Clayton, C. R. I., 2006. Attenuation of seismic waves in methane gas hydrate-bearing sand. *Geophys. J. Int.*, 164(1): 149—159. doi:10.1111/j.1365—246X.2005.02831.x
- Sassen, R., Losh, S. L., Cathles III, L., et al., 2001. Massive vein-filling gas hydrate: relation to ongoing gas migration from the deep subsurface in the Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 18(5): 551—560. doi:10.1016/S0264—8172(01)00014—9
- Satyavani, N., Thakur, N. K., Aravind Kumar, N., et al., 2005. Migration of methane at the diapiric structure of the western continental margin of India—insights from seismic data. *Marine Geology*, 219(1): 19—25. doi:10.1016/j.margeo.2005.04.008
- Schroot, B. M., Klaver, G. T., Schüttenhelm, R. T. E., 2005. Surface and subsurface expressions of gas seepage to the seabed—examples from the Southern North Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 22(4): 499—515. doi:10.1016/j.marpetgeo.2004.08.007
- Sloan, E. D., 1998. Clathrate hydrates of natural gases. Marcel Dekker, Inc, New York, 705.
- Song, H. B., Dong, C. Z., Chen, L., et al., 2008. Reflection seismic methods for studying physical oceanography: introduction of oceanography. *Progress in Geophysics*, 23(4): 1156—1164 (in Chinese with English abstract).
- Suess, E., Torres, M. E., Bohrmann, G., et al., 1999. Gas hydrate destabilization: enhanced dewatering, benthic material turnover and large methane plumes at the Cascadia convergent margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 170(1—2): 1—15. doi:10.1016/S0012—821X(99)00092—8
- Wood, W. T., Hart, P. E., Hutchinson, D. R., et al., 2008. Gas and gas hydrate distribution around seafloor seeps in Mississippi Canyon, northern Gulf of Mexico, using multi-resolution seismic imagery. *Marine and Petroleum Geology*, 25(9): 952—959. doi:10.1016/j.marpetgeo.2008.01.015
- Wu, N. Y., Yang, S. X., Wang, H. B., et al., 2009. Gas-bearing fluid influx sub-system for gas hydrate geological system in Shenhu area, northern South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(6): 1641—1650 (in Chinese with English abstract).
- Wu, N. Y., Zhang, H. Q., Yang, S. X., et al., 2007. Preliminary discussion on natural gas hydrate (NGH) reservoir system of Shenhu area, north slope of South China Sea. *Natural gas industry*, 27(9): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S. G., Dong, D. D., Yang, S. X., et al., 2009. Genetic model of the hydrate system in the fine grain sediments in the northern continental slope of South China Sea.

*Chinese Journal of Geophysics*, 52(7): 1849—1857 (in Chinese with English abstract).

Xu, H. N., Yang, S. X., Zheng, X. D., et al., 2010. Seismic identification of gas hydrate and its distribution in Shenhu area, South China Sea, *Chinese Journal of Geophysics*, 53(7): 1691—1698 (in Chinese with English abstract).

Yin, X. J., Zhou, H. Y., Yang, Q. H., et al., 2008. The evidence for the existence of methane seepages in the northern South China Sea: abnormal high methane concentration in bottom waters, *Acta Oceanologica Sinica*, 30(6): 69—75 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈林, 宋海斌, 2005. 海底天然气渗漏的地球物理特征及识别方法. *地球物理学进展*, 20(4): 1067—1073.

董崇志, 宋海斌, 拜阳, 等, 2010. 地震海洋学研究进展. *地球物理学进展*, 25(1): 109—123.

龚再升, 李思田, 汪集旻, 等, 2004. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究. 北京: 科学出版社, 339.

匡增桂, 郭依群, 2011. 南海北部神狐海域新近系以来沉积相及水合物成藏模式. *地球科学——中国地质大学学报*, 36(5): 914—920.

宋海斌, 董崇志, 陈林, 等, 2008. 用反射地震方法研究物理海洋—地震海洋学简介. *地球物理学进展*, 23(4): 1156—1164.

吴能友, 杨胜雄, 王宏斌, 等, 2009. 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. *地球物理学报*, 52(6): 1641—1650.

吴能友, 张海啟, 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.

吴时国, 董冬冬, 杨胜雄, 等, 2009. 南海北部陆坡细粒沉积物天然气水合物系统的形成模式初探. *地球物理学报*, 52(7): 1849—1857.

徐华宁, 杨胜雄, 郑晓东, 等, 2010. 南中国海神狐海域天然气水合物地震识别及分布特征. *地球物理学报*, 53(7): 1691—1698.

尹希杰, 周怀阳, 杨群慧, 等, 2008. 南海北部甲烷渗漏活动存在的证据: 近底层海水甲烷高浓度异常. *海洋学报*, 30(6): 69—75.