

DOI:10.3724/SP.J.1140.2012.02115

浅剖资料在南海北部东沙西南海域 水合物调查中的应用

郑红波^{1,2}, 阎贫¹, 刘海龄¹, 王彦林¹

(1 中国科学院 边缘海地质重点实验室, 中国科学院 南海海洋研究所, 广州 510301;

2 中国科学院 广州天然气水合物研究中心, 广州 510640)

摘要:南海北部东沙海域陆坡已经被证实为天然气水合物前景分布区, 浅地层剖面数据以其高效率采集过程和浅表层高分辨率的特点被国内外学者应用到天然气水合物调查中并取得了很多成果。以南海北部东沙西南海域的两条浅剖测线为例, 分析了该区浅表层沉积物的声学特征, 并在浅剖剖面上发现了浅层含气带以及气体泄露现象, 初步推测为深部的天然气水合物分解后通过断层运移到浅层中形成了浅层含气带, 部分浅层气体还通过泄露点喷射到海水中从而形成了剖面中的气体泄露现象。最后, 进一步通过对研究区域的沉积及气源条件、温压条件、地质及生物证据的讨论, 证实该区具有天然气水合物发育的基本条件, 因此, 可以证实上述浅剖资料解释中关于天然气水合物的推测。

关键词:天然气水合物; 浅剖资料; 南海北部陆坡

中图分类号:P744.4

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2012)02-0115-06

天然气水合物是由甲烷等气体分子与水分子在低温高压条件下形成的冰状结晶或固态物质, 主要储存于海底或寒冷地区的永久冻土带。20世纪70年代初, 深海钻探项目(DSDP)第1次直接从深海沉积物中采集到天然气水合物, 从而证实了这种矿产资源的存在。目前世界海底已经探明的天然气水合物中, 其中估算的碳含量相当于世界已探明的石油、天然气和煤的总碳量的两倍多^[1]。由于这一潜在能源的巨大储量, 许多国家的研究人员纷纷在各国的大陆边缘开展了广泛的天然气水合物的调查研究, 中国也已在南海北部神狐海域陆坡钻取了天然气水合物样品^[2]。

在天然气水合物的调查中, 多道反射地震方法是一种最重要的地球物理研究手段。多道地震数据不但能清晰直观地反映较大深度范围内的海底地层结构和构造, 还能获取海底地层的速度信息, 甚至可以反演海底地层的孔隙度、渗透率、泊松比等物性参数, 地震剖面上的似海底反射(WSR)特征、极性倒转、速度倒转等特征被认为是天然气水合物发育的

重要证据, 因此, 被国内外学者广泛应用到天然气水合物的调查研究中, 取得了非常好的效果也获得了很多成果^[3-7]。

浅剖也是海洋地质调查中常用的地球物理方法, 浅地层剖面仪采用自激自收方式进行数据采集, 它的信号发射单元向海底发射高频的声波信号, 同时信号接收单元接收海底地层反射回来的声波信号, 通过处理海底地层反射回来后的声波信号数据, 就能得到清晰的海底地层结构及构造剖面, 由于浅剖仪的声波信号频率比多道地震声波信号高很多, 因此, 它在海底浅表层的探测上比多道地震方法有着更高的分辨率, 可以反映更丰富的海底地层结构及构造细节, 所以, 在海洋工程地质勘察、富钴结壳等矿产资源调查等领域发挥重要作用^[8-9]; 近年来浅剖资料也被大量应用到国内外海洋天然气水合物调查中, 取得了较好的效果。李守军等^[10]利用浅地层剖面资料以及单道地震资料分析了南海神狐海域水合物分布区的地层沉积特征, 在浅剖剖面上识别了麻坑、声反射空白带等典型的水合物发育声学特征; Chen 等^[11]利用浅剖、声纳、多道地震等资料综合研究了台湾西南海域水合物的发育情况。本文以南海北部东沙西南海域陆坡上的两条测线 gh1 和 gh2 的浅剖数据为例(测线位置见图 1), 结合该区的其他地质、地球物理资料, 研究该区天然气水合物的发育及分布。

基金项目:中国科学院广州天然气水合物研究中心开放基金项目(CASHYD07s2); 国家自然科学青年科学基金项目(41106056); 声场声信息国家重点实验室开放课题研究基金项目(SKLOA201106)

作者简介:郑红波(1981—), 男, 助理研究员, 现从事海洋地球物理与海洋地质研究, E-mail: hongbozheng@126.com

收稿日期:2011-07-11; 改回日期:2011-10-23. 文凤英编辑

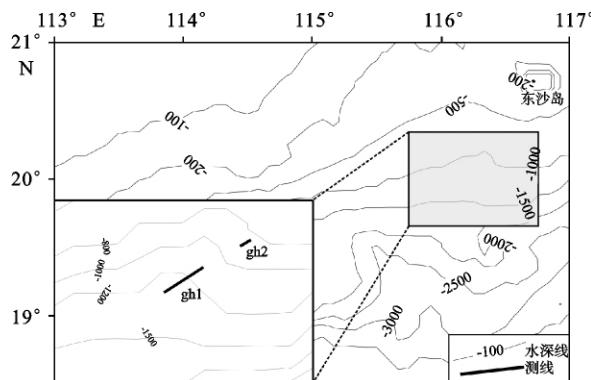


图 1 东沙西南海域浅剖测线位置

Fig. 1 The location of sub-bottom profile survey lines

1 数据采集与处理

1.1 区域地质背景

本文所采用的浅剖测线位于南海北部陆坡东沙岛西南部白云凹陷内,白云凹陷位于南海北部珠江口盆地南部的陆坡上,水深 200~3 000 m,海底沉积物以黏土质粉砂为主^[12],沉积层较厚,在陆坡中部存在海底麻坑、丘状沉积体等可能是泥底辟的沉积构造^[13],适合油气和水合物的聚集。2006 年白云凹陷北部 1 480 m 水深处 LW3-1-1 井钻取了 56 m 厚的气层,显示了此处深水陆坡区巨大的油气潜力^[14]。

1.2 浅剖资料采集与数据处理

本次数据采集于 2008 年 4 月由中国科学院南海海洋研究所“实验 2”号地球物理调查船完成。浅

剖数据采集系统为美国 Edgetech 公司生产的 3200XS,发射的声波频率为 0.5~2.7 kHz,采样间隔为 0.2 ms,最大地层穿透深度为 50~100 m,可分辨厚度小于 1 m 的地层。测线从珠江口外大陆架进入白云凹陷中下陆坡区,水深从 800 到 1 300 m;海上工作期间风平浪静,海况良好,船速 4.0~5.0 节,因此本次采集的浅剖数据质量较高。

浅剖仪采集的是基于希尔伯特变换后的解析信号数据,也可将其转换为具有正负极性的振幅信号数据,因此浅剖数据与常规地震数据的处理方法大致相同,但由于浅剖数据是单道数据,其处理流程与常规地震数据处理有所不同。处理流程主要包括带通滤波、中值滤波、自动增益控制、反褶积等提高分辨率和增强信噪比的模块,最后采用 1 500 m/s 的速度将时间剖面转换为深度剖面。

2 资料解释与分析

图 2 为测线 gh1 的浅地层包络数据剖面图,该测线大致平行于陆坡走向,从地形特征来看,该测线大致以炮号 SP2700 点为界将测线分为两部分,SW 部分海底地形起伏较大,可见一处落差达 100 m 以上的滑塌体,而 NE 部分海底地形则较为平缓,只有一处宽度达 2 500 m,落差只有 30 多米的洼陷地带。声波的穿透性在整条测线的分布也明显不同,从 NE—SW 方向来看,炮号 SP1356—SP1935 之间声波穿透性好,平均穿透深度约为 50 m,最大穿透深度达 60 m,反射层位清晰、连续性好,沉积层为连续平行的纹层;测线中间部分 (SP2000—SP2700) 声波穿透性较差,平均穿透深度只有 20 m 左右;炮号

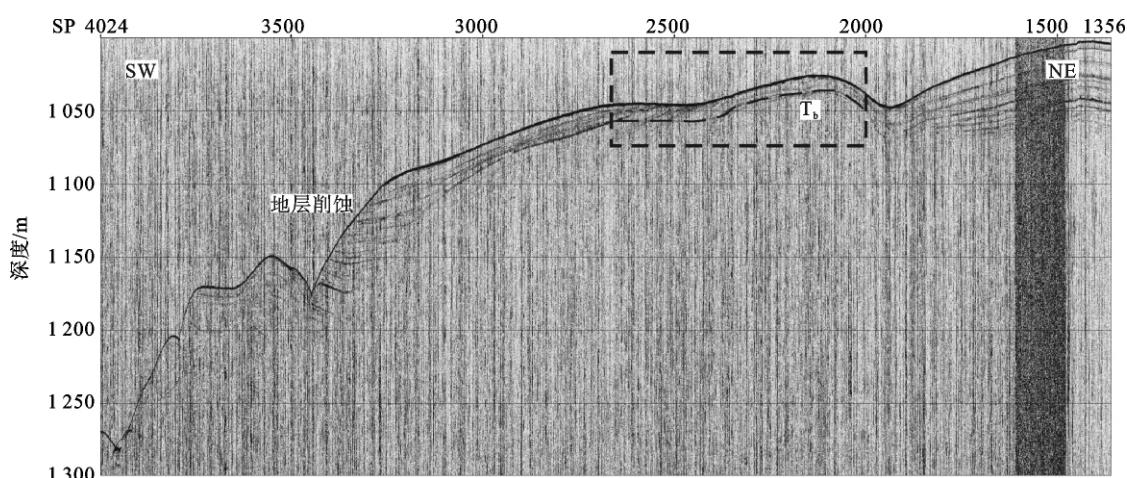


图 2 东沙西南海域测线 gh1-2 浅剖包络数据剖面

Fig. 2 Envelope data sub-bottom profile line gh1-2

SP2670—SP3885 之间声波穿透性较好,但分布不均匀,平均穿透深度约为 40 m,地层反射层位较清晰,连续性较好,并可见因滑塌作用形成的地层削蚀现象;炮号 SP3885—SP4024 之间的声波穿透性差,几乎看不到海底以下的有效反射层位。其中 SP2080—SP2670 之间存在着平行于海底的反射层 T_b ,该反射层层位较清晰、连续性也较好,平均深度大约在海底以下 25 m;从外部形态上与海底大致平行,且其上覆地层振幅出现明显的弱反射,在下伏地层几乎无法识别有效的反射层位;其中在 SP2670 处,该反射层 T_b 与地层反射层产生大角度斜交,该特殊的声反射界面可解释为浅部地层含气带,该含气带气体主要来源于地层深部的天然气水合物分解后的甲烷等气体,部分气体经中部地层中的断裂、泥底辟等构造上升运移到浅部地层中,使该含气带以下地层沉积物中充填大量的气体,导致声波能量大部分被吸收从而使下伏地层几乎看不到有效的声波反射信号,这也与多道地震剖面中的水合物 BSR 特征类似。

图 3 为测线 gh2 的浅地层包络数据剖面图,该测线与 gh1 测线大致在一条直线上,也平行于陆坡走向,从地形特征来看,该测线的地形起伏较大部分主要集中在测线的中间部位,落差近 200 m,而测线两端的地形落差则较小。声波的穿透性在本条测线上的表现与 gh1 线区别较大,本条测线声波的穿透性整体较差,具体表现在海底的声波反射强度较大,而海底以下地层的反射振幅强度却很弱,按地形特征分为三部分进行说明。从 NE—SW 方向来看,炮号 SP425—SP790 之间地形起伏较小,其声波穿透性相对稍好,穿透深度最大可达 30 m,海底反射强度较弱,海底以下地层反射振幅强弱不均匀,从而使反射层位不连续;炮号 SP790—SP1055 之间地形变

化最大,海底反射强度较大,声波的穿透性较差,海底以下的有效层位难以分辨,局部可见绕射波现象,推测为地层内部的断层所导致;炮号 SP1055—SP1300 地形起伏较小,海底反射强度较大,声波穿透性较差,海底以下有效地层不明显,可见海底以下地层起伏较大而形成的绕射波。该测线上有两处声波反射异常点,分别位于图 3 所示的虚线框内,海底以上部分可见舌状和烟状回波,中心位置分别位于 SP837 和 SP1093 处,宽度约为 100 m,高度分别约为 50 和 15 m,且在海底附近均可见绕射波现象。根据这两处异常点的特征,推测这两处异常点为海底气体泄露点;海底的天然气水合物分解为气体后,在气体泄露点大量向海水中喷射渗漏,在海底以上部分形成的舌状及烟状回波是由于声波反射在泄漏的气体上形成的,而海底附近的绕射波则是由于气体泄露点地层的中断形成的。

3 讨论

为了证实上文中关于天然气水合物发育的推测,我们结合测线所在区域的沉积及气源条件、温度压力、以及地质及生物等其他资料进行分析讨论。

3.1 沉积及气源条件

该测线地理位置上位于南海北部陆坡中段的东沙海域附近,构造上位于珠江口盆地白云凹陷东部。新生代沉积厚度达 1 000~7 000 m,沉积速率大,ODP1144 井揭示 1 Ma 以来沉积速率为 400~1 200 m/Ma,ODP1145 井反映在晚中新世以来沉积速率为 150~210 m/Ma,为水合物的发育提供了良好的沉积条件^[15];东沙海域陆坡区渐新统及以上地层有机碳含量高,浅表层地质样品的酸解烃、顶空气测试

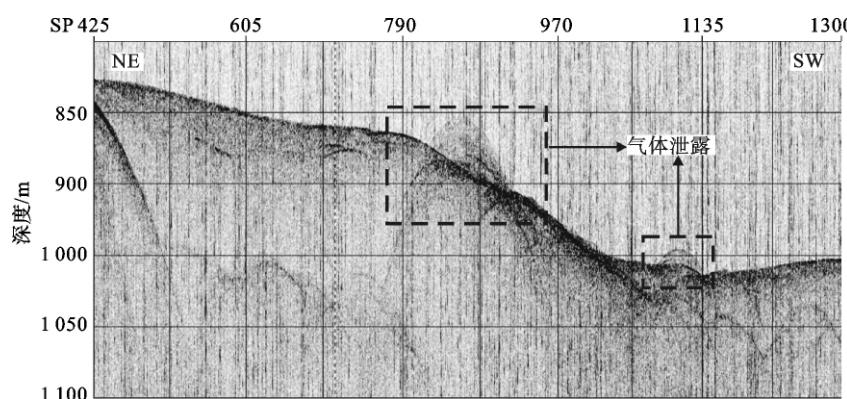


图 3 东沙西南海域测线 gh2 浅剖包络数据剖面
Fig. 3 Envelope data of sub-bottom profile line gh2

及ODP1144、ODP1146等多个站位的分析结果均不同程度地发现了生物成因气、热解烃气和混合气体的富集,深部热裂解气及浅部的生物气易运移到浅部地层内成藏,说明研究区域具有天然气水合物形成所需的充足气源。

3.2 温度压力条件

天然气水合物的形成及分布与气体组成、温度(海底温度、地温梯度)、静水压力(水深)等条件有关。Paull等^[16]给出了天然气水合物稳定存在的理论温度压力值,与挤压构造条件下的DSDP/ODP(如在美国布莱克海台、日本西南海槽等)天然气水合物钻探研究结果吻合较好。本区出现浅层含气带的水深约为1020 m,海底静水压力约10 MPa。本区地温梯度为75~105 °C/km^[17],海底温度取4 °C,地温梯度取最低75 °C/km及最高105 °C/km,属于高地温梯度区,根据理论相图(图4)算出天然气水合物稳定厚度最大约80 m,表明本区域具备天然气水合物稳定存在的温度压力条件。

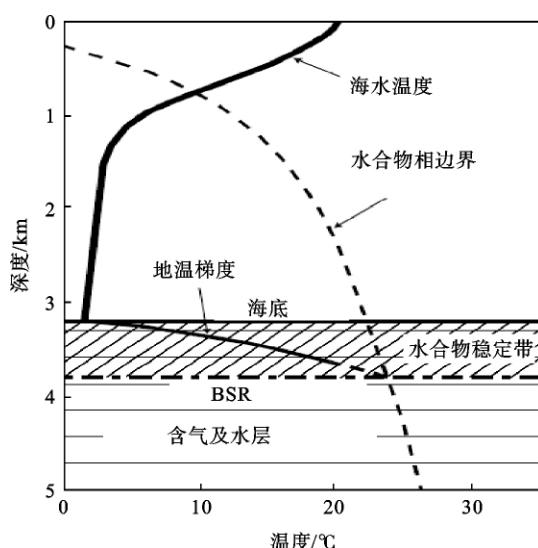


图4 天然气水合物稳定相图

Fig. 4 The stability phase diagram of gas hydrate

3.3 地质及生物证据

天然气水合物通常在地层断裂至海底的地方发生渗漏,在海底渗漏喷口常发育有高密度化学自养生物群,通过这种自养生物群的新陈代谢过程,使甲烷转变为CO₂与海水中的钙离子结合,形成含有自养生物的碳酸盐岩沉淀^[18-19],在海底底质上表现为固结的碳酸盐岩结壳,因此,深水区海底碳酸盐岩结壳是寻找天然气渗漏系统的一个有效标志。本文的

研究区域白云凹陷内已经进行了大量的拖网及沉积物采样工作,拖网及采样资料表明该区存在大范围的碳酸盐沉积物^[20],图5为2006年南海北部开放航次在南海北部东沙海域采到的碳酸盐岩结壳的样品,因此,从地质及生物证据可以推断本研究区域有天然气水合物发育。

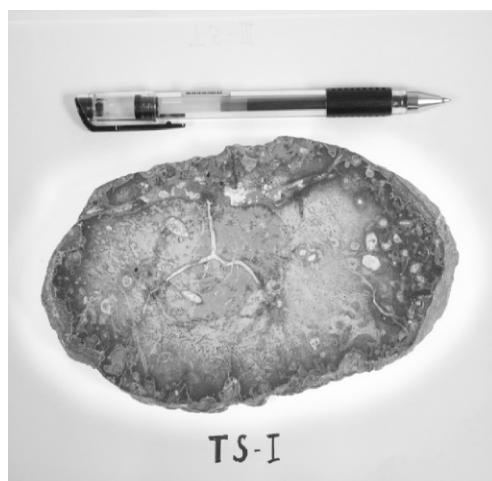


图5 东沙西南海域部分碳酸盐岩结壳样品

Fig. 5 A sample of carbonate crust

4 结论

(1)高分辨率的浅剖数据不仅能清晰地揭示海底浅表层的地层结构及构造,还能反映海底浅地层中含气带以及海底发生的气体泄露现象。

(2)通过对东沙海域西南陆坡上的浅剖数据的分析,结合该区的沉积及气源条件、温压条件、地质及生物证据,推断测线所在区域具有天然气水合物发育及分布。

参考文献(References)

- [1] 许东禹,吴必豪,陈邦彦.海底天然气水合物的识别标志和探测技术[J].海洋石油,2000,4:1-7. [XU Dongyu, WU Bihao, CHEN Bangyan. The identification and detection techniques for submarine gas hydrate[J]. Ocean Oil, 2000,4:1-7.]
- [2] 陆敬安,杨胜雄,吴能友,等.南海神狐海域天然气水合物地球物理测井评价[J].现代地质,2008,22(3):447-451. [LU Jingen, YANG Shengxiong, WU Nengyou, et al. Well logging evaluation of gas hydrates in Shenhua area, South China Sea[J]. Geoscience—Journal of Graduate School, China University of Geosciences, 2008,22(3):447-451.]
- [3] Andreassen K, Hart P E, Grantz A. Seismic studies of a bottom simulating reflection related to gas hydrate beneath the

- continental margin of the Beaufort Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 12 659-12 673.
- [4] 张光学,黄永样,陈邦彦. 海域天然气水合物地震学[M]. 北京:海洋出版社,2003. [ZHANG Guangxue, HUANG Yongxiang, CHEN Bangyan. *Ocean Gas Hydrates Seismology* [M]. Beijing: Ocean Press, 2003.]
- [5] 邓辉,阎贫,刘海龄. 台湾西南海域似海底反射分析[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(2): 79-85. [DENG Hui, YAN Pin, LIU Hailin. Analysis on bottom simulating reflectors in southwest Taiwan sea area[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(2): 79-85.]
- [6] 宋海斌,吴能友,吴时国,等. 南海东北部973剖面地震资料处理及其BSR特征[C]//中国边缘海海盆演化与资源效应. 北京:海洋出版社, 2004. [SONG Haibin, WU Nengyou, WU Shiguo, et al. 973 seismic data process and BSR characters in the northeast South China Sea[C]//*Evolution of China's Marginal Sea Basin and It's Effect of Natural Resources*. Beijing: Ocean Press, 2004.]
- [7] 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 Shenhua Area, South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(7): 1691-1698.]
- [8] 刘秀娟,高抒,赵铁虎. 浅地层剖面原始数据中海底反射信号的识别及海底地形的自动提取[J]. *物探与化探*, 2009, 33(5): 576-579. [LIU Xiujuan, GAO Shu, ZHAO Tiehu. The recognition of the seabed reflection signal and the automatic pickup of seabed topography from the original data of sub-bottom profile[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2009, 33[5]: 576-579.]
- [9] 何高文,梁东红,宋成兵,等. 浅地层剖面测量和海底摄像联合应用确定平顶海山富钴结壳分布界线[J]. *地球科学*, 2005, 30(4): 509-512. [HE Gaowen, LIANG Donghong, SONG Chengbin, et al. Determining the distribution boundary of cobalt-rich crusts of guyot by synchronous application of sub-bottom profiling and deep-sea video recording[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(4): 509-512.]
- [10] 李守军,初凤仪,方银霞,等. 南海北部陆坡海山浅地层与单道地震剖面联合解释——水合物区沉积地层特征[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(4): 56-62. [LI Shoujun, CHU Fengyou, FANG Yinxia, et al. Associated interpretation of sub-bottom and single-channel seismic profiles from slope of Shenhua Area in the northern South China Sea-characteristics of gas hydrate sediment[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(4): 56-62.]
- [11] Song-Chuen Chen, Shu-Kun Hsu, Ching-Hui Tsai, et al. Gas seepage, pockmarks and mud volcanoes in the near shore of SW Taiwan[J]. *Mar Geophys Res.*, 2010, 31: 133-147.
- [12] 苏广庆,范时清,陈绍谋,等. 南海中北部沉积图集[C]. 广东科技出版社, 1989. [SU Guangqing, FAN Shiqing, CHEN Shaomou, et al. *Atlas of north-central South China Sea sediments* [C]. Guangdong Science and Technology Press, 1989.]
- [13] 阎贫,陈多福. 南海北部白云凹陷渗漏型天然气水合物地球物理证据[J]. *热带海洋学报*, 2009, 28(3): 1-5. [YAN Pin, CHEN Duofu. New geophysical evidence for gas hydrates in Baiyun Sag in the northern margin of the South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2009, 28(3): 1-5.]
- [14] 朱俊章,施和生,何敏,等. 珠江口盆地白云凹陷深水区LW3-1-1井天然气地球化学特征及成因探讨[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(2): 229-233. [ZHU Junzhang, SHI Hesheng, HE Min, et al. Origins and geochemical characteristics of gases in LW3-1-1 well in the deep sea region of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(2): 229-233.]
- [15] 黄永样,Ervin Suess,吴能友,等. 南海北部陆坡甲烷和天然气水合物地质[M]. 北京:地质出版社, 2008. [HUANG Yongxiang, Ervin Suess, WU Nengyou, et al. *Geology of CH₄ and Gas Hydrates on the Continental Slope of Northern South China Sea* [M]. Beijing: Geology Press, 2008.]
- [16] Paull C K, Matsumoto R, Wallace P J, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program. *Scientific Results* [R]. 2000: 164.
- [17] 李亚敏,罗贤虎,徐行,等. 南海北部陆坡深水区的海底原位热流测量[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(9): 2161-2170. [LI Yamin, LUO Xianhu, XU Xing, et al. Seafloor in-situ heat flow measurements in the deep water area of the northern slope South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(9): 2161-2170.]
- [18] 陈多福,陈先沛,陈光谦,冷泉流体沉积碳酸盐岩的地质地球化学特征[J]. *沉积学报*, 2002, 20(1): 34-40. [CHEN Duofu, CHEN Xianpei, CHEN Guangqian. Geology and geochemistry of cold seepage and venting-related carbonates[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(1): 34-40.]
- [19] Samantha B J, Boetius A and Orcutt B N. The anaerobic oxidation of methane and sulfate reduction in sediments from Gulf of Mexico cold seeps[J]. *Chemical Geology*, 2004, 205: 219-238.
- [20] 陈忠,杨华平,黄奇瑜,等. 南海东沙西南海域冷泉碳酸盐岩特征及其意义[J]. *现代地质*, 2008, 22(3): 383-390. [CHEN Zhong, YANG Huaping, HUANG Qi-yu, et al. Diagenetic environment and implication of seep carbonate precipitations from the southwestern Dongsha Area, South China Sea[J]. *Geoscience-Journal of Graduate School, China University of Geosciences*, 2008, 22(3): 383-390.]

THE APPLICATION OF SUB-BOTTOM PROFILE TO GAS HYDRATE INVESTIGATION IN SOUTHWEST DONGSHA SEA AREA, NORTHERN SOUTH CHINA SEA

ZHENG Hongbo^{1,2}, YAN Pin¹, LIU Hailin¹, WANG Yanlin¹

(1 CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology;

2 Guangzhou Center for Gas Hydrate Research, Chinese Academy of Sciences)

Abstract: It has been confirmed that the continental slope of Dongsha area in the northern South China Sea (SCS) is a prospecting area for gas hydrate. Sub-bottom profiling, due to its efficiency and high resolution, is widely applied in the investigation of gas hydrate by domestic and foreign scholars. In the paper, we selected two sub-bottom profile survey lines from the southwest Dongsha area in the northern SCS to reveal acoustic characteristics of shallow sediments. Shallow gas strata were divided and gas seepage phenomena observed from the sub-bottom profiles. It is speculated that there was deep gas hydrate decomposition and migration vertically or horizontally along faults. Shallow gas escaped around the gas seepage points. According to the availability of gas source, temperature and pressure combination and geological and biological evidence from the research area, it is inferred that the research area is favorable for gas hydrate formation.

Key words: gas hydrate; sub-bottom profile; continental slope in northern SCS