

BSR 及其下伏游离气区的分布特征与控制因素

杨金秀¹, Richard Davies², 肖佃师¹, 苗秀青¹, 张亚念¹

[1. 中国石油大学(华东)非常规油气与新能源研究院, 山东 青岛 266580;

2. School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University, NE1 7RU, UK]

摘要:拟海底反射层(Bottom Simulating Reflector, 简称BSR)是水合物底界的地震反射标志,其上部的振幅空白带是含水合物地层的反射特征,下部的高振幅异常区代表了下伏的游离气区(Free Gas Zones, 简称FGZs)。利用高分辨率三维地震资料,精细描述了毛里塔尼亚滨海地区的BSR和FGZs的地震反射特征及其与周边沉积构造单元的关系。BSR在底辟构造上部出现上拱现象,在靠近峡谷两壁时BSR位置快速变深。据分析,在底辟构造带,沿断裂体系向上运移的热流体改变了此处的水合物稳定条件,导致水合物稳定底界向上变浅。而峡谷对周边沉积物的冷却作用使当地的水合物稳定条件发生与底辟构造带处相反的变化,导致水合物稳定底界向下发生移动,在地震上表现为BSR深度的增加。另外,研究发现BSR和FGZs在流体运移通道较发育的地区,如断层、气烟囱和底辟构造带地区更加发育,证明流体运移体系在该地区对水合物和FGZs的形成具有十分重要的作用,提供了水合物体系的气源供给。

关键词:拟海底反射层;流体运移;三维地震;游离气区;天然气水合物;毛里塔尼亚

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Distributions of BSR and underlying free gas zones and related controlling factors

Yang Jinxiu¹, Richard Davies², Xiao Dianshi¹, Miao Xiuqing¹, Zhang Yanian¹

(1. Research Institute of Unconventional Petroleum and New Energy, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China; 2. School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University, NE1 7RU, UK)

Abstract: Bottom Simulating Reflector (BSR) is the seismic reflection marker of the base of gas hydrates. The blanking zones above represent hydrate-bearing sediments and the abnormally high amplitude zones below represent free gas zones (FGZs) sealed by hydrates. In this paper, high resolution 3D seismic data from offshore Mauritania are used to characterize in detail the seismic reflection characters of BSR and underlying FGZs, as well as their relations with nearby structural units. The BSR upwarps in the upper part of the diapir and deepens rapidly near canyon walls. In the diapir zone, the thermal flow migrating along the fault system during dipirism changed the hydrate stability conditions, causing the shallowing of the stable bottom boundary of BSR. The cooling of the surrounding deposits by the canyon, on the contrary, caused the deepening of the stable bottom boundary of BSR. Additionally, research shows that the BSR and FGZs are prone to form in areas with well-developed fluid migration conduits such as faults and chimneys, indicating that the fluid migration system is critical for the formation of gas hydrate and FGZs and may provide gas source for the hydratesystem.

Key words: Bottom Simulating Reflector (BSR), fluid migration, 3D seismic, free gas zone, gas hydrate, Mauritania

天然气水合物俗称“可燃冰”,存在于多年冻土带、海洋沉积物和深湖相沉积物中^[1,2]。目前,世界上许多海域直接或间接发现了天然气水合物,其中包括中国的南海北部陆坡、南沙海槽和东海陆坡^[3,4]。据保守估计,水合物的总资源量,相当于世界已知煤、石油和天然气总量的两倍^[5,6]。水合物的稳定性对环境条件有很高要求,一般存在于高压(>10 MPa)和低温

(0~10℃)条件下^[7]。当温压条件发生改变超出水合物的稳定条件时,水合物会快速分解,释放出大量气体和水,甚至会引发地质灾害,如海底滑坡,毁坏海上作业机器甚至引发海啸^[8,9]。水合物分解后释放的甲烷等气体如果逃逸到海水及大气中,更可能会引起气候变化^[7,10]。

受水合物稳定性控制,海洋环境中水合物稳定区

收稿日期:2015-01-06;修订日期:2015-12-03。

第一作者简介:杨金秀(1984—),女,博士、讲师,天然气水合物、海洋地质学和油气地球物理勘探。E-mail: yangjinxiu@upc.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41406050);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014010212);中国石油大学科研启动基金项目(2014010570)。

(Gas Hydrate Stability Zone: GHSZ) 主要位于浅部地层,位于海底以下埋深几百米的沉积物中,水深范围为 400 ~ 3 000 m^[1,11,12]。GHSZ 下部,水合物不能稳定存在,游离气和水存在于水合物层下部,一般被称为游离气区(Free Gas Zones: FGZs)。GHSZ 与 FGZs 之间的界面为水合物底界(Base of the Gas Hydrate Stability Zone: BHSZ),BHSZ 是分隔水合物相与游离气相的界面,在地震资料上通常表现为与海底平行、斜切等时地层、具有负极性和高振幅特征的拟海底反射层 BSR (Bottom Simulating Reflector)^[1,9]。

水合物的形成和分布主要受温度、压力、气体组分、饱和度、孔隙水组成(如盐度)和沉积物的物理特性等因素控制^[10]。温度压力等条件的微小变化可能导致水合物发育区的向上或者向下移动,而温压条件的变化可能受沉积作用或剥蚀作用所驱动^[13~14]。当水合物稳定区上移时,水合物底界附近的水合物分解,释放出大量游离气和水,并保存在新的水合物底界下部的新 FGZs 中^[8,15]。一般认为,BSR 的地震特征主要是由游离气而非水合物造成,因为较低的游离气饱和度(3% ~ 5%)即可能导致纵波速度的快速下降^[16]。BSR 上部可见振幅空白带反射异常,可能是由水合物对沉积物孔隙的充填胶结作用导致的,一般认为空白带是含水合物地层的地震识别方法之一^[1,10,14]。BSR 下部的强振幅异常反射区,通常代表了 FGZs 的分布。由于含水合物地层是较好的低渗透盖层,因此游离气

容易保存在水合物底部,形成 FGZs。

根据构造发育特征,在研究区的不同区块分别讨论影响水合物和游离气形成和分布的构造因素,主要是指流体运移通道对水合物成藏与游离气聚集所起的作用。对毛里塔尼亚海域水合物分布特征的地球物理研究在最近几年开始进行^[4,14,16]。该地区具有高分辨率的三维地震资料显示出典型而连续的 BSR 分布,且 BSR 附近地震反射特征明显、清晰,有利于对天然气水合物体系进行精细分析。目前,对该地区水合物体系的研究较为零散,发表的文献也往往是针对小范围区域内的某一具体现象。因此,本文利用高分辨率三维地震资料,综合分析整个研究区的水合物和游离气分布特征,并根据 BSR 附近的流体运移通道特征,结合地震振幅等地震属性特征对控制水合物和游离气分布的因素进行讨论,为今后该地区水合物进一步勘探开发提供参考。

1 区域地质概况

毛里塔尼亚海域位于西非被动型大陆边缘,具有相对较窄的大陆架和中等宽度的大陆隆起^[17](图1)。大陆斜坡较为平缓,倾角约为 1° ~ 3°^[18]。中侏罗世时期,毛里塔尼亚盆地附近的海底扩张导致了北大西洋的开启。研究认为,毛里塔尼亚大陆边缘是一个潜在的石油成藏区带,此处具有高孔隙度的中新世浊流河道可作为储层,被上覆低渗透的废弃河道相或半远

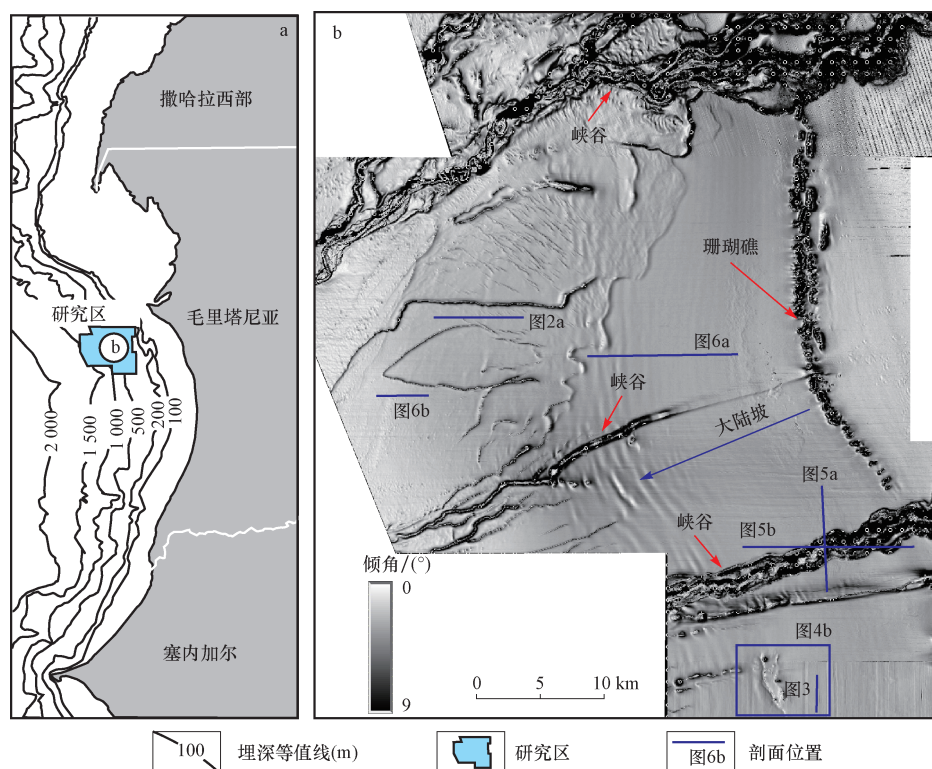


图1 毛里塔尼亚海域的三维地震数据体位置(a)以及研究区海底的倾角属性(b)

Fig. 1 Location of the 3D seismic data volume from offshore Mauritania (a) and the dip map of the seabed (b)

洋沉积的页岩层所覆盖^[17]。其他晚白垩世和古新世时期沉积的深海泥岩也可能是烃源岩。在过去的几百万年里,来自撒哈拉沙漠的大量风成沉积物被运送至该地区^[19]。沉积作用主要受半深海环境中的碎屑流和浊流影响,沉积物主要为有孔虫类和陆源的泥质和硅质碎屑浊积岩^[18]。沉积速率受气候、沉积物供给和构造环境等因素控制,该地区位于大洋边缘的上升流范围内,因此沉积速率比较高,约为 80 ~ 160 mm/y^[18,20]。

该区域的新近系中发育有许多块状搬运复合体 (Mass Transport Complexes; MTCs),这可能与陆坡环境下高沉积速率的未固结沉积物的沉积作用有关^[20]。毛里塔尼亚海底滑坡复合体是非洲西北部大陆边缘中最大的一个块状搬运复合体,约 34 000 km²,其典型特征为垂向上向陆地倒退的滑坡。该研究区内发育的新近系块状搬运复合体位于毛里塔尼亚海底滑坡复合体的北部,也具有向陆地倒退的垂向复合体。研究区的块状搬运复合体下部还发育有新近系的多边形断层体系,关于其成因仍然存在分歧^[21-24]。另外,研究区还发育有峡谷、底辟构造和断裂体系等构造单元,对浅部的水合物体系具有一定影响。

2 数据与方法

研究区的高分辨率三维地震资料于 1999 年和 2000 年通过拖缆勘探采集,主要用于油气勘探。该三维数据体覆盖面积约 4,000 km²,由 3481 条主测线和 5521 条联络测线构成。Tullow Oil 和 Petronas 公司已对该地震数据进行了系列处理,包括多次波压制处理和叠后时间偏移处理,未进行零相位处理,未使用自动增益控制方法 (Automatic Gain Control; AGC)。该地震数据的主要频率是 50 Hz,因此其垂向分辨率约为 8.5 m,相对于主频波长的 1/4。地震网格 (主测线与联络测线) 的间隔是 25 m × 25 m。在地震剖面上,垂向上的纵坐标为双程走时 (Two Way Travel Time; TWT),水平方向的横坐标为距离 (m 或者 km)。在地震反射剖面上,海底为正极性,其表现为红色反射层。因此,地震上的红色反射和黑色反射分别代表了声波时差的增加和降低。

通过作者对地震资料的精细解释,发现研究区发育有广泛分布的水合物,具体表现为地震剖面上分布广泛、连续并斜切等时地层的 BSR。本文利用三维地震资料,追踪、解释 BSR 以及相关等时地层,并进行振幅、倾角等各种面属性提取,通过地震剖面和相关反射层的属性平面图对 BSR 和 FGZs,以及周边断层、底辟构造等特征进行精细解释,从而掌握水合物与下伏游离气的分布特征,并讨论其可能的控制因素。

3 结果

地震资料表明,研究区 BSR 分布广泛、连续,具有强振幅、负极性以及与海底大致平行的特点 (图 2 - 图 5)。在 BSR 上部,可见振幅空白带 (Blanking Zone; BZ) 异常反射特征,这可能是由于水合物对沉积物孔隙的充填胶结作用,从而使地层均质性增强,减少了波阻抗差,进而导致了地震剖面上呈现振幅空白带异常^[25]。在 BSR 下部,可见具有高振幅异常反射区,一般解释为被水合物所覆盖或封堵的 FGZs (图 2 - 图 6)。研究区位于被动大陆边缘,构造活动相对比较简单。本文根据构造发育特征将研究区细分为四类区块:断层发育区、底辟构造区、峡谷发育区和构造相对稳定区。下面分别就这四类区块内的水合物及下部游离气的分布进行描述。

3.1 断层发育区

由于研究区构造活动不剧烈,因此并不发育大规模

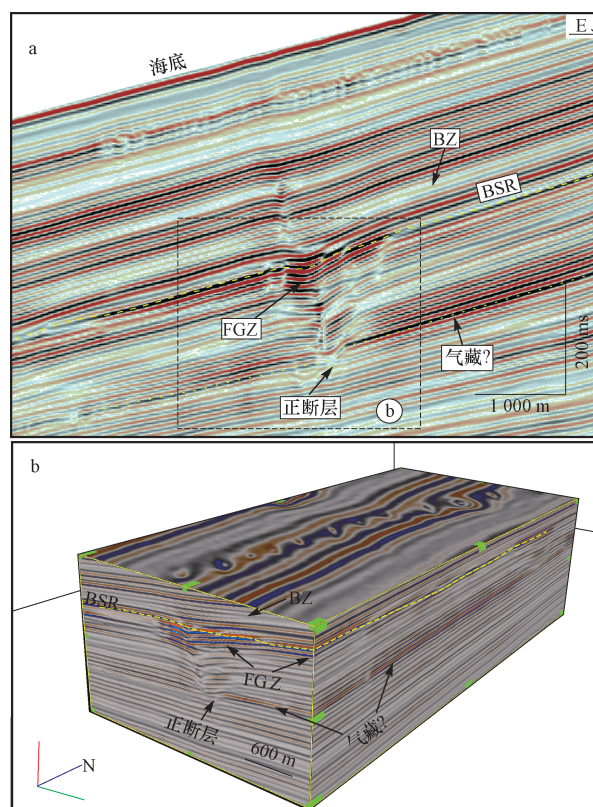


图2 地震剖面(a)和三维地震数据体(显示b剖面)显示断层与水合物体系和底部FGZs的空间匹配关系 (据文献[16]修改,剖面位置见图1)

Fig. 2 Seismic line (a) and 3D seismic volume (showing seismic line b) demonstrating the spatial relationship between the fault, gas hydrates and underlying FGZs (after [16], see Fig. 1 for the location)

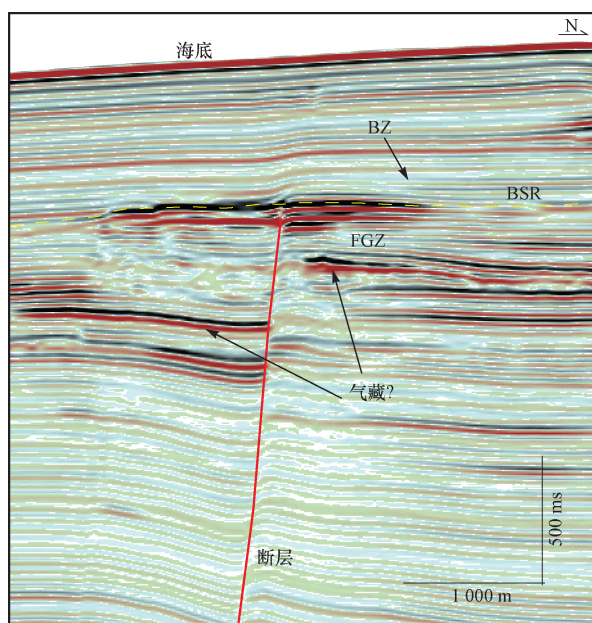


图3 地震剖面显示断层作为运移通道沟通深部地层与浅部水合物体系(剖面位置见图1)

Fig. 3 Seismic line showing faults acting as fluid migration conduits connecting deep strata with shallower hydrates (see Fig. 1 for the location)

模断裂体系。在某些地区发育有小尺度正断层,位于该地区 BSR 底部约 200 ms 处(图 2)。Yang 等对该类断层做过精细描述,分析了断层位置、沿断层的高振幅异常和上部 FGZs 的空间位置关系及地震反射特征^[16]。地震证据表明,此类小尺度正断层在水合物底界上移过程中发挥过重要作用。具体过程如下:水合物发育在断层所在地层中,当水合物稳定条件发生变化,水合物稳定底界上移时,下部水合物分解,释放出大量水和游离气并产生高压,在高压驱动下,断层重新活动,断层下盘的流体沿该断层上移至新的水合物底界。一般认为,游离气在该过程之后有两种命运:一是

保存在新的 FGZs 中;二是进入到水合物层与水作用形成水合物。研究区浅层存在许多此类小断层,当水合物底界位于其附近且温压条件发生变化时,这些小断层可能会发挥类似的作用。

另外,在某些地区发育有贯穿深度相对较大的断层,与深部底辟构造有一定关系。此类断层两盘均发现高振幅异常,且具有与海底相反的极性,解释为气藏(图 3)。该断层顶部为 FGZs,地震剖面上显示其被 BSR 所覆盖。此类断层为沟通浅部水合物与地层较深部气源的通道,为水合物和 FGZs 的形成提供了气源。地震数据显示,在断层周边没有流体运移通道发育的地区,BSR 的振幅强度较弱,也没有发现 FGZs。

3.2 底辟构造发育区

研究区的东南部发育有底辟构造。通常情况下,底辟构造发育于超强压发育区,易形成垂向上的热流输导体系,影响浅部水合物体系的稳定性,使水合物底界上移^[26,27]。如果是盐底辟构造,孔隙水盐度的增加则能够抑制水合物的形成,使水合物的稳定底界向具有更低温度的区域(浅部地层)迁移^[28]。该地区地震剖面显示,在底辟构造发育带,BSR 在底辟构造上部具有上拱的反射特点,形态与底辟构造带的背斜地层类似,分析认为该特征主要是受温压条件控制(图 4a)。该底辟构造与周边地层的界限并不十分明显,虽然该底辟构造位置较浅,但在平面上表现为长形而非圆形(图 4b)。综合分析认为,它属于泥底辟构造。本地区与此泥底辟构造伴生的断层十分发育,这些伴生断层大多位于底辟构造的内部,将深部热流体向上运移至浅部,从而影响水合物体系的分布,使地震上的 BSR 出现上拱的特征。上拱型 BSR 代表了实际的水合物

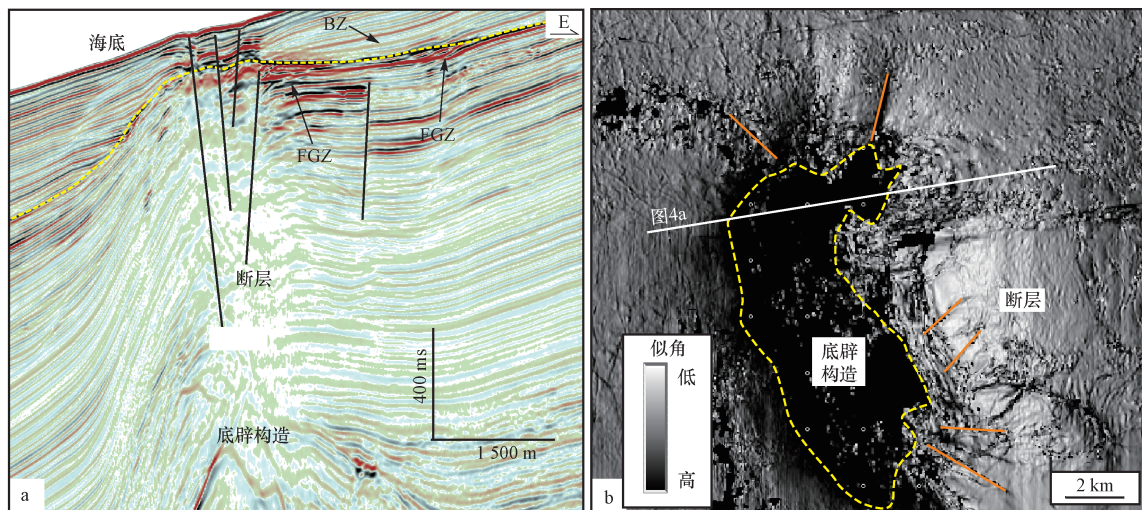


图4 地震剖面(a)和 BSR 倾角平面图(b)显示底辟构造特征(剖面位置见图1)

Fig. 4 Seismic line (a) and dip map of the BSR (b) showing characteristics of the diapir (see Fig. 1 for the location)

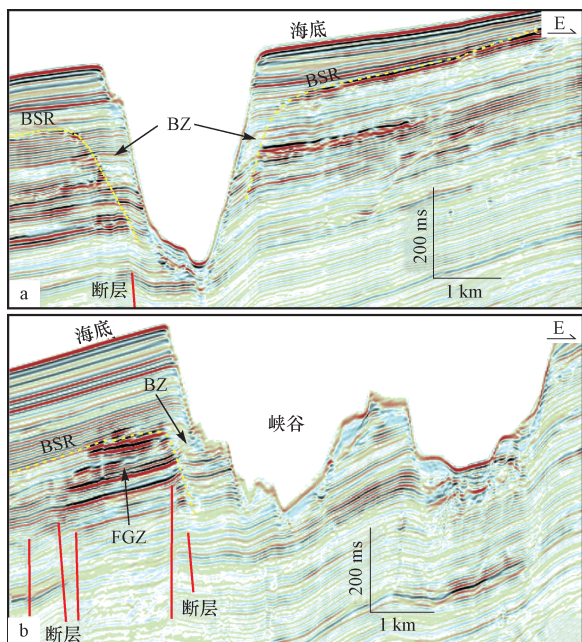


图5 地震剖面显示峡谷地区的BSR和FGZs地震反射特征
(据文献[4]修改,剖面位置见图1)

Fig. 5 Seismic line showing the BSR and FGZ in the canyon area (after [4], see Fig. 1 for the location)

底界,是理想的构造圈闭。因此,通过伴生断层运移到浅部的游离气也易于保存在水合物底部,形成FGZs(图4a)。

3.3 峡谷发育区

研究区的峡谷主要分布在北部和南部地区,其平面延伸方向与斜坡方向一致(图1)。地震资料显示,在靠近峡谷的两壁时,BSR的深度快速增加,且在峡谷底部位置BSR特征不明显,BSR在该处的分布出现中断(图5)。在其中一个峡谷发育区,发现有FGZs发育,该FGZs在垂向上和侧向上受BSR限制,反映出该FGZs在垂向上和侧向上有水合物封堵(图5b)。前人研究认为,峡谷两壁处的BSR深度增加是由峡谷的冷却作用导致的^[4,29]。峡谷的下切作用通过冷却峡谷两壁附近的沉积物来改变当地的地热状况,使水合物的稳定底界下移。对比横切两个峡谷的地震剖面,发现在FGZs发育的地区,其下部存在许多断层;而无FGZs发育的地区下部几乎没有流体运移通道。由此推断,在研究区的峡谷地区,流体运移通道对FGZs的形成具有十分重要的作用,它为FGZs的形成提供了气源。

3.4 气烟囱发育区

研究区属于被动大陆边缘,构造相对稳定,沉积物主要为深海、半深海的细粒沉积物^[17]。地震资料显示,BSR在研究区分布连续,主要是利用其“斜切等时地层”的反射特点进行追踪、解释。通过对比大量不同

的地震剖面,发现BSR振幅较强、水合物底部发育FGZs的地区大多都有气烟囱发育。在无气烟囱发育地区,BSR振幅不强,也没有明显FGZs发育(图6)。一般认为,气烟囱是具有高渗透性的良好流体运移通道,主要形成于细粒沉积物中,对地层中的油气运移与聚集具有重要作用^[30]。研究区构造相对稳定,强振幅BSR和FGZs的形成与气烟囱的共生关系,说明了流体运移通道对水合物体系形成(BSR和FGZs)的重要作用。

4 结论

1) BSR在研究区内分布较为连续,具有与海底大致平行、强振幅和负极性典型水合物特征。在底辟构造发育区BSR出现上拱现象,可能是由于深部热流体沿与底辟构造相伴生的断裂体系上移,造成水合物体系温压条件变化,进而导致水合物底界上移;在峡谷地区,由于峡谷对周边沉积物的冷却作用使水合物稳定底界向下移动,造成了BSR在峡谷两壁处的快速加深。

2) 通过对比分析大量地震剖面,发现研究区内具有较强振幅的BSR和底部FGZs更倾向于形成在流体运移通道发育的地区,如断层、底辟构造和气烟囱存在的地区,反映出流体运移体系对该地区的水合物体系(包括BSR和FGZs的形成)具有十分重要的作用。

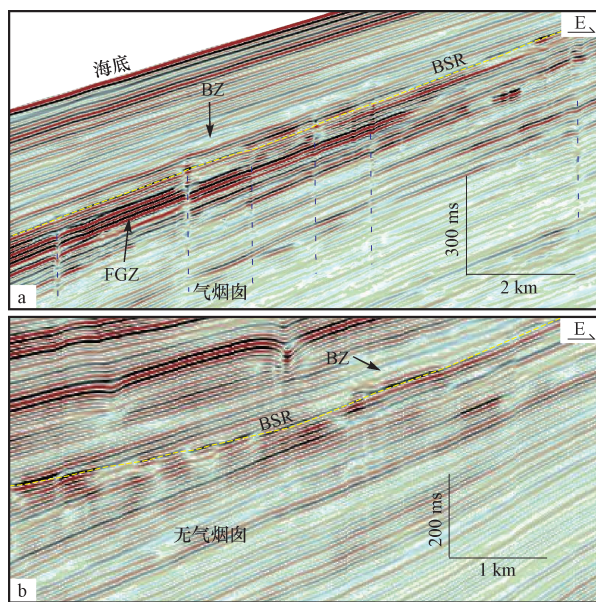


图6 地震剖面显示构造相对稳定区的BSR,FGZs和气烟囱的分布特征(据文献[4]修改,剖面位置见图1)

Fig. 6 Seismic line showing the distribution of the BSR, FGZs and some chimneys in a relatively stable area
(after [4], see Fig. 1 for the location)

参 考 文 献

- [1] Shipley T H, Houston M H, Buffler R T, et al. Seismic evidence for widespread possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises[J]. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 1979, 63: 2204 – 2213.
- [2] 陈多福, 李绪宣, 夏斌. 南海琼东南盆地天然气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 – 489.
Chen Duofu, Li Xuxuan, Xia Bin. 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 – 489.
- [3] Klauda J B, Sandler S I. Global distribution of methane hydrate in Ocean Sediment[J]. *Energy Fuel*, 2005, 19: 459 – 470.
- [4] Davies R J, Thatcher K E, Mathias S A, et al. Deepwater canyons: An escape route for methane sealed by methane hydrate[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 323 – 324: 72 – 78.
- [5] Kvenvolden K A. Methane hydrate in the global organic carbon cycle[J]. *Terra Nova*, 2002, 14(5): 302 – 306.
- [6] 王秀娟, 吴时国, 刘学伟, 等. 基于测井和地震资料的神狐海域天然气水合物资源量估算[J]. *地球物理学进展*, 2010, 25(4): 1288 – 1297.
Wang Xiujuan, Wu Shiguo, Liu Xuewei, et al. Estimation of gas hydrates resources based on well log data and seismic data in Shenhu area[J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(4): 1288 – 1297.
- [7] Gay A, Lopez M, Cochonat P, et al. Sinuous pockmark belt as indicator of a shallow buried turbiditic channel on the lower slope of the Congo Basin, West African Margin[J]. *Geological Society of London, Special Publication*, 2003, 216: 173 – 189.
- [8] Dickens G R, O'Neil J R, Rea D K, et al. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene[J]. *Paleoceanography*, 1995, 10: 965 – 971.
- [9] 宋海斌, 林松修, 仓本真一. 西南海海槽地震资料处理及其似海底反射层[J]. *地球物理学报*, 2001, 44(6): 799 – 804.
Song Haibin, Matsubayashi Osamu, Kuramoto Shin'ichi. Processing of seismic data of western Nankai trough and its character bottom simulating reflector[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(6): 799 – 804.
- [10] Bünnz S, Mienert J, Berndt C. Geological controls on the Storegga gas-hydrate system of the mid-Norwegian continental margin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 209: 291 – 307.
- [11] 姚伯初. 南海的天然气水合物矿藏. *热带海洋学报*[J]. 2001, 20(2): 20 – 28.
Yao Bochu. The gas hydrate in the South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2001, 20(2): 20 – 28.
- [12] Westbrook G K, Thatcher K E, Rohling E J, et al. Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L15608.
- [13] Dickens G R. On the fate of past gas: What happens to methane released from a bacterially mediated gas hydrate capacitor[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2001, 2(2): 819 – 836.
- [14] Davies R J, Clarke A L. Methane recycling between hydrate and critically pressured stratigraphic traps, offshore Mauritania[J]. *Geology*, 2010, 38: 963 – 966.
- [15] Haacke R R, Westbrook G K, Hyndman R D. Gas hydrate, fluid flow and free gas: Formation of the bottom-simulating reflector[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 261(3 – 4): 407 – 420.
- [16] Yang J, Davies R J. Gravity-driven faults: Migration pathways for recycling gas after the dissociation of marine gas hydrates[J]. *Marine Geology*, 2013, 336: 1 – 9.
- [17] Vear A. Deep-water plays of the Mauritanian continental margin[J]. *Petroleum Geology Conference Series*, 2005, 6: 1217 – 1232.
- [18] Henrich R, Hanebuth T J J, Krastel S, et al. Architecture and sediment dynamics of the Mauritania Slide Complex[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25: 17 – 33.
- [19] Antobreh A, Krastel S. Mauritania Slide Complex: morphology, seismic characterisation and processes of formation[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2007, 96: 451 – 472.
- [20] Krastel S, Wynn R B, Hanebuth T J J. Mapping of seabed morphology and shallow sediment structure of the Mauritania continental margin, Northwest Africa: some implications for geohazard potential[J]. *Norwegian Journal of Geology*, 2006, 86: 163 – 176.
- [21] Cartwright J A. Episodic basin-wide hydrofracturing of overpressured early Cenozoic mudrock sequences in the North Sea Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1994, 11: 587 – 607.
- [22] Gay A, Lopez M, Cochonat P, et al. Polygonal faults-furrows system related to early stages of compaction-Upper Miocene to recent sediments of the Lower Congo Basin[J]. *Basin Research*, 2004, 16: 101 – 116.
- [23] Ireland M T, Goult N R, Davies R J. Influence of pore water chemistry on silica diagenesis: evidence from the interaction of diagenetic reaction zones with polygonal fault systems[J]. *Journal of the Geological Society*, 2010, 167: 273 – 279.
- [24] Davies R J, Ireland M T. Initiation and propagation of polygonal fault arrays by thermally triggered volume reduction reactions in siliceous sediment[J]. *Marine Geology*, 2011, 289: 150 – 158.
- [25] Hyndman R D, Davis E E. A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom-simulating-reflectors by vertical fluid expulsion[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B5): 7025 – 7041.
- [26] Clayton C J, Hay S J, Baylis S A, et al. Alteration of natural gas during leakage from a North Sea salt diapir field[J]. *Marine Geology*, 1997, 137(1 – 2): 69 – 80.
- [27] 张敏强, 莺歌海盆地底辟构造带天然气运聚特征: 石油大学学报[J]. 2000, 24(4): 39 – 42.
Zhang Minqiang. Migration and accumulation characteristics of natural gas in the diapir structure belt of Yinggehai Basin[J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2000, 24(4): 39 – 42.
- [28] Sloan E D. *Clathrate hydrates of natural gases*: 2nd edition[M], 1998, New York.
- [29] Hickey B M. Response of a narrow submarine canyon to strong wind forcing[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1997, 27: 697 – 726.
- [30] Gay A, Lopez M, Cochonat P, et al. Isolated seafloor pockmarks linked to BSRs, fluid chimneys, polygonal faults and stacked Oligocene-Miocene turbiditic palaeochannels in the Lower Congo Basin[J]. *Marine Geology*, 2006, 226: 25 – 40.