

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2014.01129

南海东北部陆坡海底微地貌特征 及其天然气渗透模式

尚久靖^{1,2}, 吴庐山^{1,2}, 梁金强^{1,2}, 沙志彬^{1,2}

(1. 广州海洋地质调查局, 广州 510760;

2. 国土资源部 海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广州 510760)

摘要:海底天然气渗漏是海洋环境中广泛分布的自然现象,在世界各大洋中都有发现。海底渗漏可以极大地改变海底地貌特征,形成多种与之相关的微地貌类型。海底渗漏和天然气水合物的赋存具有密切的关系,海底渗漏区常伴有埋藏浅、饱和度高的天然气水合物。对南海东北部陆坡海域浅地层剖面、多波束测深和地震反射剖面等资料进行综合研究,识别出海底麻坑、海底丘状体、大型海底圆丘、泥火山等与海底天然气渗漏有关的微地貌类型,且麻坑、海底丘状体/大型海底圆丘、泥火山微地貌分别代表了浅覆盖层快速天然气渗漏、浅覆盖层中等速度天然气渗漏和厚覆盖层快速天然气渗漏 3 种天然气渗漏模式。具有海底丘状体微地貌及声空白反射特征的浅层天然气聚集带,成为块状水合物最理想的发育场所,这可能称为南海北部陆坡勘察块状水合物的重要识别标志。

关键词:天然气渗漏模式;海底微地貌;水合物;南海东北部陆坡

中图分类号:P737.2

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2014)01-0129-08

海底天然气渗漏是海洋环境中广泛分布的自然现象,在世界各大洋中都有发现^[1]。目前已在北海、波罗的海、黑海、北大西洋、墨西哥湾、日本海、日本南海海槽、地中海、印度洋和西南太平洋等海域发现了 900 多个冷泉渗漏活动区^[2-4]。海底天然气渗漏可以极大地改变海底地形地貌,形成海底麻坑、自生碳酸盐岩结壳、海底丘状体、大型海底圆丘、泥火山等微地貌类型^[5-12]。以这些微地貌特征为标志的海底冷泉发育区和天然气水合物的赋存具有密切的关系,冷泉区海底常发育有埋藏浅、饱和度高的天然气水合物^[13-14]。初步的估计认为,全球范围内与海底冷泉有关的水合物天然气资源达 $10^{10} \sim 10^{12} \text{ m}^3$ ^[15-16]。本文利用南海北部陆坡海域采集的浅地层剖面、多波束测深和地震反射剖面等资料进行综合研究,对上述与海底渗漏相关的微地貌类型进行识别,建立了研究区海底天然气渗漏模式,为水合物找矿提供相应的依据。

1 地质背景

南海北部陆坡深水区蕴藏着丰富的油气及天然

气水合物资源^[17],对于该区域渗漏特征的系统性论述起始于 21 世纪初。虽然我国关于海底天然气渗漏相关的研究起步较晚,但是对与海底渗漏相关的微地貌方面的研究取得了一系列进展:沙志彬等在西沙海槽海域识别出与海底渗漏相关的滑塌体、丘状体、麻坑等^[18];中德合作“SO177”航次在东沙海域发现了大片冷泉碳酸盐岩丘——“九龙甲烷礁”^[19];Chuang 等对台西南海域的泥火山进行了报道^[20];李守军等在神狐海域发现了与渗漏相关的丘状体、麻坑等异常微地貌^[21];王秀娟等在琼东南海域发现了泥火山、海底冷泉等微地貌,并发现了直径 860 m,深度约 30 m 的大麻坑^[22];孙启良在西沙隆起海域发现了大量“超大型”麻坑^[17]。海底麻坑、自生碳酸盐岩结壳、海底丘状体、泥火山等微地貌的广泛发现,指示了南海北部陆坡海域存在广泛的海底渗漏现象。

研究区位于南海东北部陆坡,水深范围 500~1 600 m,水深变化相对较大。本次研究主要收集到北西—南东向浅地层剖面、三维地震反射剖面及多波束测深数据,其中利用 Parasound P70 参量浅层剖面仪(4~20 kHz)对该海域浅地层剖面进行测量,穿透深度可达海底以下 100 m;地震采集选取 12.5 m 道间距,覆盖 48 次,采样间隔 1 ms,地震数据经过去噪、球面扩散补偿、去多次波、面元扩展、叠加、偏移等技术进行处理;采用 EM122 多波束测深系统对研究区海底地貌形态进行测量,延时为 0,当水深小于 800 m 时左右条幅开角设为 50°,水深大

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2009CB219502);
国家高技术研究发展计划课题(2006AA09A202);国家专项项目
(GZH201100305)

作者简介:尚久靖(1983—),男,硕士,助理工程师,主要从事海洋地球物理研究,E-mail:shjj2012@126.com

收稿日期:2013-03-10;改回日期:2013-04-09. 周立君编辑

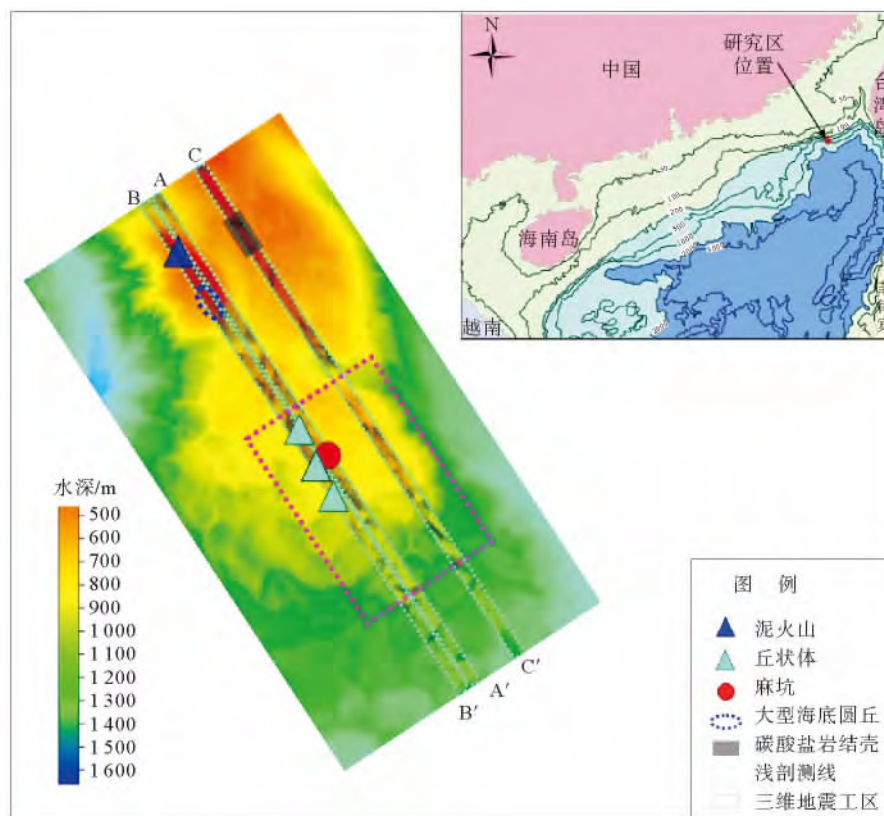


图1 研究区地貌及测线位置

Fig. 1 Study area is located on the slope of northern South China Sea

于 1 000 m 时开角设为 90° , 吃水深 5.6 m, 获得了较清晰的海底地貌图像。

2 与渗漏相关的海底微地貌特征

通过浅地层剖面、地震反射剖面和多波束测深资料综合研究, 识别出海底麻坑、海底丘状体、大型海底圆丘、泥火山、自生碳酸盐岩结壳等与海底天然气渗漏有关的多种微地貌类型。

2.1 麻坑

麻坑是沉积地层中的流体向海底快速强烈喷发过程中形成的不等、形态各异的海底凹坑^[23]。1987 年, Hovland 最早提出北海海底麻坑的形成与海底甲烷渗漏活动有关的论述, 随后在全球海域内发现了越来越多的海底麻坑, 如挪威北部陆坡^[24]、赤道西非陆坡^[25]、白令海^[26]、北海^[27]、加拿大西部陆架^[28]、墨西哥湾^[29]、黑海^[30] 及中国南海^[31] 等海域。典型麻坑一般直径 20~250 m, 深 1~25 m^[5], 但是也有大型麻坑报道的案例, 如孙启良在南海琼东南海域发现了直径达 3 210 m, 深 165.2 m 的巨型麻坑^[17]。

利用多波束、浅地层剖面及地震剖面联合解释, 发现了研究区中部地区存在大型麻坑的证据(如图 2), 其中一个麻坑呈拉长的椭圆形, 长轴 720 m, 短轴长 450 m, 深 20 m。穿过该麻坑的浅地层剖面显示, 麻坑周围存在大量高角度的声空白反射现象, 且声空白周围可见叠加的增强反射层。而在地震剖面上, 则显示麻坑正下方浅部存在 BSR 反射, 深部则出现反射杂乱的气烟囱, 气烟囱的周围可见增强反射层。

2.2 海底丘状体

Hovland M 和 Judd A G^[6] 在北海 Norwegian 峡谷海底发现了小型丘状体, 其下存在柱状声学透明带, 指示其可能是垂向排溢的气体或孔隙水, 海底丘状体与海底渗漏的关系被揭示出来。此后, 世界不同海域与甲烷渗漏相关的海底丘状体陆续被报道出来, 如新西兰大陆架^[12]、鄂霍次克海^[32]、美国加州北部湾^[33]、黑海^[34]、韩国东海^[35] 等均有相关报道。

研究区中部发现了如图 3 所示的小型海底丘状体, 在海底三维地形图上, 由北西向南东 A、B、C 3 个小型丘状体一字排列, 丘状体直径 180~210 m, 高 5~10 m, 平面上大致对称, 起伏相对平缓。在浅

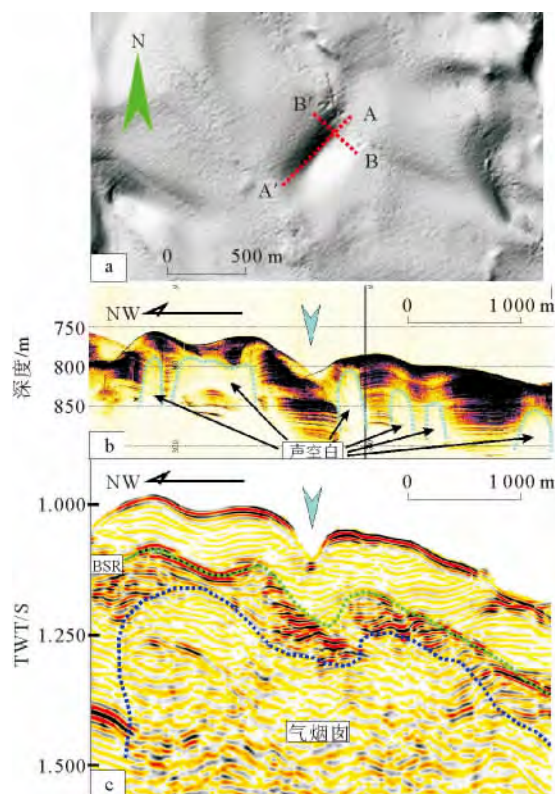


图 2 南海东北部陆坡发现的大型麻坑

(a)海底三维地形图,麻坑呈拉长椭圆形;(b)浅地层剖面(箭头指示麻坑位置),剖面穿过 BB'。麻坑周围可见高角度声空白和增强反射层;(c)地震剖面(箭头指示麻坑位置),剖面穿过位置 BB'。浅部可见 BSR 反射,深部为杂乱反射的气烟囱

Fig. 2 The large scale pockmark in study area

(a) Multi-beam geomorphologic map. The pockmark displays an e-longated elliptical shape; (b) A sub-bottom profile (arrow points pockmark). i. e. the B'B in fig. a. The high angle columnar shaped acoustic blank and strong reflectors are located near the pockmark. (c) seismic profile (arrows indicate the position of pockmark), that passes through profile B'B in fig. a. The BSR can be observed in the shallow strata, and the gas chimney can be seen in the deeper part, showing a kind of chaotic seismic reflection configuration.

地层剖面上可见 3 个丘状体下方均存在高角度声空白,且丘状体周围浅部地层出现大量叠加的增强反射层。与之对应的地震剖面上,可见声空白处有小型断层发育,且丘状体发育区浅部存在 BSR 反射,深部出现大规模反射杂乱的气烟囱。小型断层为正断层,呈高角度,向下可切割至 BSR 深度。

2.3 大型海底圆丘

与浅层气有关的大型海底圆丘最早发现于爱尔兰海、北海和挪威北部海湾,这些海底圆丘均具有凸起幅度小,直径相对较大的特点。海底圆丘的形成原因与丘状体类似,都是由渗漏气体将其上部沉积物孔隙中的水置换造成局部沉积物体积膨胀而成^[23]。

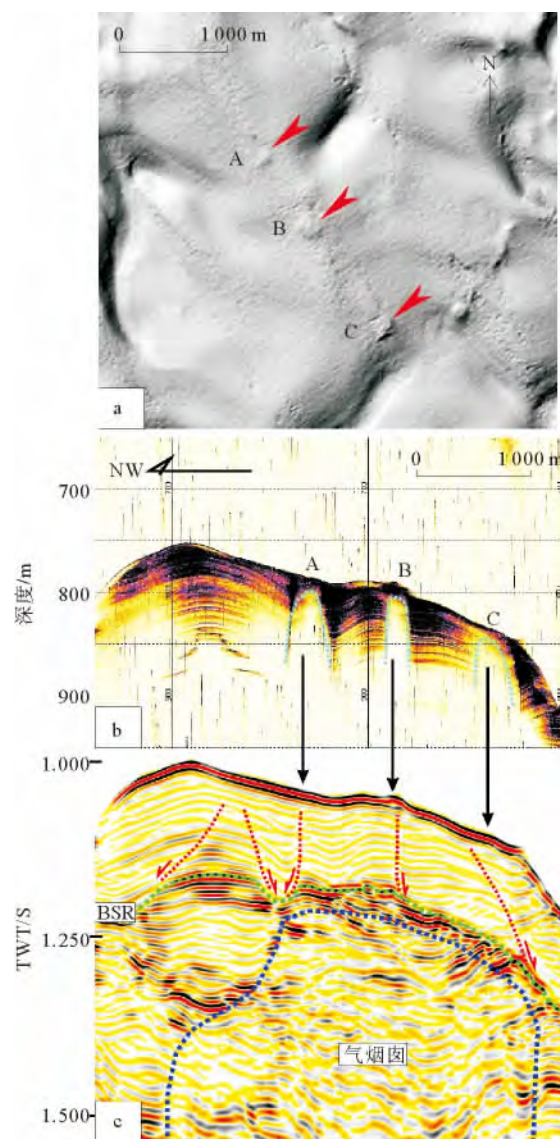


图 3 南海东北部陆坡发现的小型海底丘状体

(a)海底三维地形图,小型丘状体北西向一字排列;(b)浅地层剖面上的丘状体;(c)地震剖面上的丘状体

Fig. 3 The small scale submarine dome in study area

(a) Multi-beam geomorphologic map. Three submarine domes developed in a line. (b) The submarine domes in sub-bottom profile. (c) The submarine domes in seismic profile

多数情况下,海底圆丘位于含气层正上方,一般仅高出正常海底数米,但跨度可达数百米。在挪威近海调查发现了跨度 160 m 的海底圆丘,而在中国南黄海北部盆地则发现过跨度达 1 600 m、高 6 m 的大型海底圆丘^[23]。

在研究区内发现了直径 700 m、高 6 m 的大型海底圆丘(图 4)。该圆丘位于上陆坡一个海台处,圆丘之下浅部地层可见不规则的声空白反射特征,平面上呈拉长的椭圆形,但长轴两侧不完全对称,长轴与斜坡倾向一致。

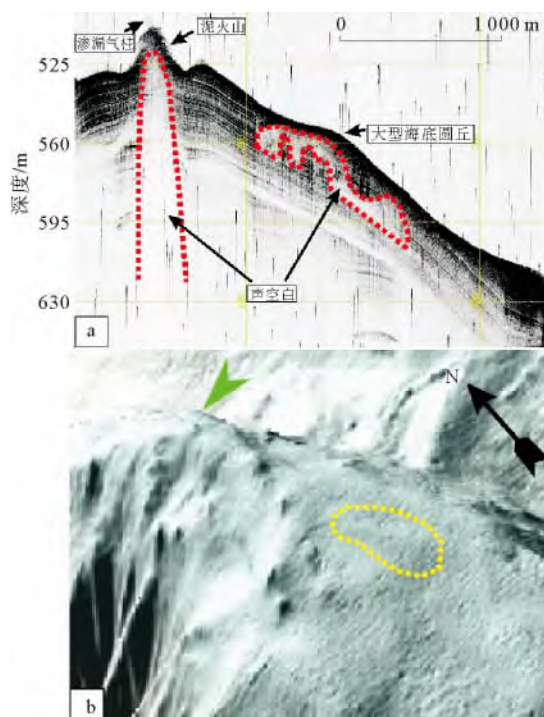


图4 南海东北部陆坡发现的泥火山和大型海底圆丘
(a)浅地层剖面,红色点线包围区为声空白;(b)海底三维地形图,绿色箭头指示泥火山位置,黄色点线为大型海底圆丘发育位置

Fig. 4 A mud volcano and large scale submarine hummock in the study area

(a) The sub-bottom profile. The acoustic blanking area is delineated by the red dotted line. (b) The multi-beam 3-D image of The mud volcano and large scale submarine hummock. The volcano is emphasized by green arrow, and the large scale submarine hummock is delineated by the yellow dotted line

2.4 泥火山

泥火山与天然气水合物引起的甲烷渗漏之间的关系由 Ginsburg 等发现,此后在里海、黑海、布莱克海、地中海、巴巴多斯海区、尼日利亚海域、墨西哥湾和贝尔加湖等地区均发现了与泥火山有密切关系的天然气水合物及其渗漏甲烷的活动^[36-39]。

研究区同样发现了与海底渗漏有关的泥火山(图4)。该泥火山高 20 m,发育于上陆坡海台的顶部,整体呈长垣状,长轴呈北西向走向,与海台左侧海谷走向一致,泥火山沿东南走向延伸线上有链状海底丘状体发育。短轴方向(浅地层剖面穿过方向)直径达 230 m。浅地层剖面显示其下部有高角度直立的声空白发育,泥火山顶部可能为气体渗漏形成的云雾状混浊反射。

2.5 自生碳酸盐岩结壳

自生碳酸盐岩是冷泉的沉积产物之一,在海底

甲烷喷逸口普遍存在,如鄂霍次克海、埃尔河盆地、水合物脊和布莱克海脊等处发现的自生碳酸盐岩均与冷泉甲烷喷逸有关^[40]。

研究区发现了大面积的海底自生碳酸盐岩丘及结壳。图 5b 显示研究区海底发育碳酸盐岩结壳及块状体堆积。图 5a 显示出该海底摄像的位置,可以看出自生碳酸盐岩发育的地区其海底粗糙程度增加,且多伴生有海底麻坑、海底丘状体等异常微地貌类型。在浅地层剖面上自生碳酸盐岩发育的部位,海底反射强度增强,声波穿透深度明显变浅,地层的层序结构模糊,连续性变差。

3 讨论

麻坑、海底丘状体、大型海底圆丘、泥火山、自生碳酸盐岩丘或结壳等多种微地貌类型的广泛发育,指示研究区存在广泛的天然气渗漏现象。这些微地貌的形成原理、海底发生天然气的渗漏模式以及对天然气水合物的指示意义等问题值得进一步研究。

1974 年, BP Trading Ltd 承担了麻坑模拟实验^[5],该实验表明麻坑的形成对气流喷逸的速度及喷逸口上覆沉积层的厚度及岩性特征都有要求。实验显示:薄的黏土层在高速气流作用下,更容易生成麻坑;薄或厚的黏土层在低速气流作用下,表层沉积容易受到其下气泡的驱使形成丘状体;厚的黏土层在高速气流作用下,更容易形成泥底辟或泥火山。BP Trading Ltd 进行的实验使我们认识到研究区所发现的麻坑、海底丘状体或大型海底圆丘、泥火山等微地貌,虽然都与天然气渗漏有关,但可能代表了不同的渗漏模式。

图 2 地震剖面指示麻坑正下方存在 BSR (BSR 通常指示其上含水合物沉积层和其下游离气层间的物理界面),深部存在反射杂乱的气烟囱,BSR 与气烟囱之间出现大量含气特征的增强反射层。气烟囱—增强反射层—BSR 含气反射特征指示了深部气体向上运移的过程。大量的游离气圈闭于含水合物沉积层底界面以下,形成超压流体,这是形成麻坑的关键因素。在某种触发机制如海底滑塌、构造运动等作用下,超压流体发生快速渗漏,形成海底麻坑。麻坑形成后,在新的稳压条件下水合物重新生成 BSR,其在麻坑发育处保持了与海底平行的特征。

图 3 浅地层剖面和地震剖面联合解释发现,海底丘状体正下方声空白与浅部地层高角度小型断层位置上重合,且将丘状体与浅部的 BSR 沟通起来,

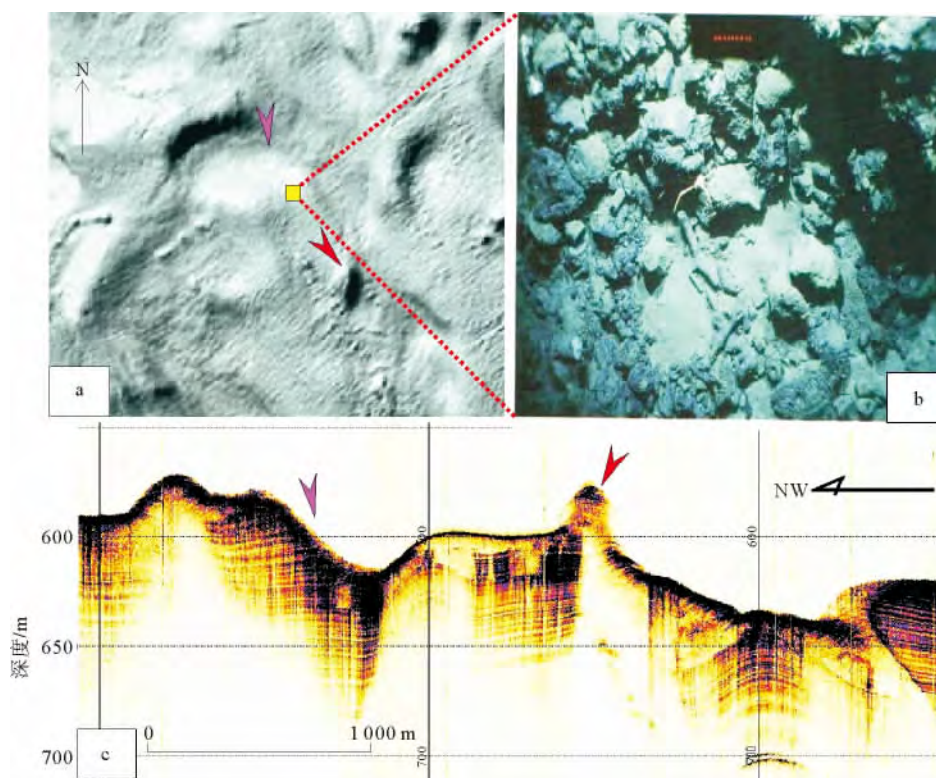


图 5 南海东北部陆坡自生碳酸盐岩丘及其声学显示特征

(a)海底三维地形图,自生碳酸盐岩丘或结壳常与海底麻坑或丘状体伴生发育;(b)图 a 中位置海底摄像发现的碳酸盐岩丘;(c)浅地层剖面,碳酸盐岩底质表现为海底强反射、穿透深度浅的反射特征。图中粉色箭头指示麻坑与图 a 中的麻坑一致,红色箭头指示的海底丘状体与图 a 中的丘状体一致。

Fig. 5 Authigenic carbonate mounds and its acoustic features

(a) The multi-beam 3-D geomorphologic map. Authigenic carbonate mounds are always associated with pockmarks and submarine domes. (b) ROV submarine photography of authigenic carbonate seafloor in the yellow blocks of fig. a. (c) The sub-bottom profile. The authigenic carbonate seafloor shows strong reflection of seabed and very shallow time depth in sub-bottom profile. The purple arrow and the red arrow indicate the same position of pockmark and submarine dome in fig. a

深部则存在大范围的气烟囱,气烟囱和 BSR 之间同样出现大量含气特征的增强反射层。气烟囱—增强反射层—BSR—声空白(高角度小断层)等含气层反射特征组合,指示了另一种海底渗漏模式:即深部气体向上运移至水合物层下方,大量的断层发育使水合物层下方的游离气难以形成超压状态,沿断层缓慢运移,直接渗漏至海底或者在近海底沉积层中圈闭起来,在驱替上覆沉积层孔隙水的同时,引起浅部沉积物的膨胀,形成海底丘状体。当浅部沉积层的气体被上覆细粒沉积层或硬质海底(如碳酸盐岩结壳等)完全封堵而难以向上运移时,缓慢运移的天然气不断积累,天然气侧向运移聚集,形成图 4 的大型海底圆丘。

泥火山的形成可能代表了另一种渗漏模式。研究区发现的泥火山(图 4),其下浅地层剖面上发育了高角度延伸较深的声空白,其深度一般超过 BSR 所在深度,与下部的气烟囱直接相连。研究区内发

育的泥火山,多呈长垣状,其走向多与局部构造发育走向一致,可能代表了断层带。气烟囱—声空白(构造断裂带)—泥火山的组合特征可能指示深部气体快速渗漏过程。构造作用下形成断层带,向下直接切割至气烟囱发育部位,形成深部气体的释压通道,天然气快速向上运移,同时携带了大量深部细粒沉积,喷逸至海底而形成泥火山。

尽管天然气的渗漏模式多样,但当甲烷气喷逸至海底时,在喷逸口附近多形成化学碳酸盐岩气烟囱、碳酸盐岩丘或碳酸盐岩结壳(图 5)。

根据不同类型的微地貌形成过程,总结了研究区天然气渗漏的模式如图 6 所示。

Harry H Roberts 等^[9]对墨西哥湾北部陆坡海底气体渗漏特征进行研究时,发现不同的天然气渗漏速度可形成不同的微地貌特征,这与 BP Trading Ltd 在 1974 年进行的麻坑生成模拟实验的结果较为吻合。海底渗漏速度还会对近海底天然气水合物

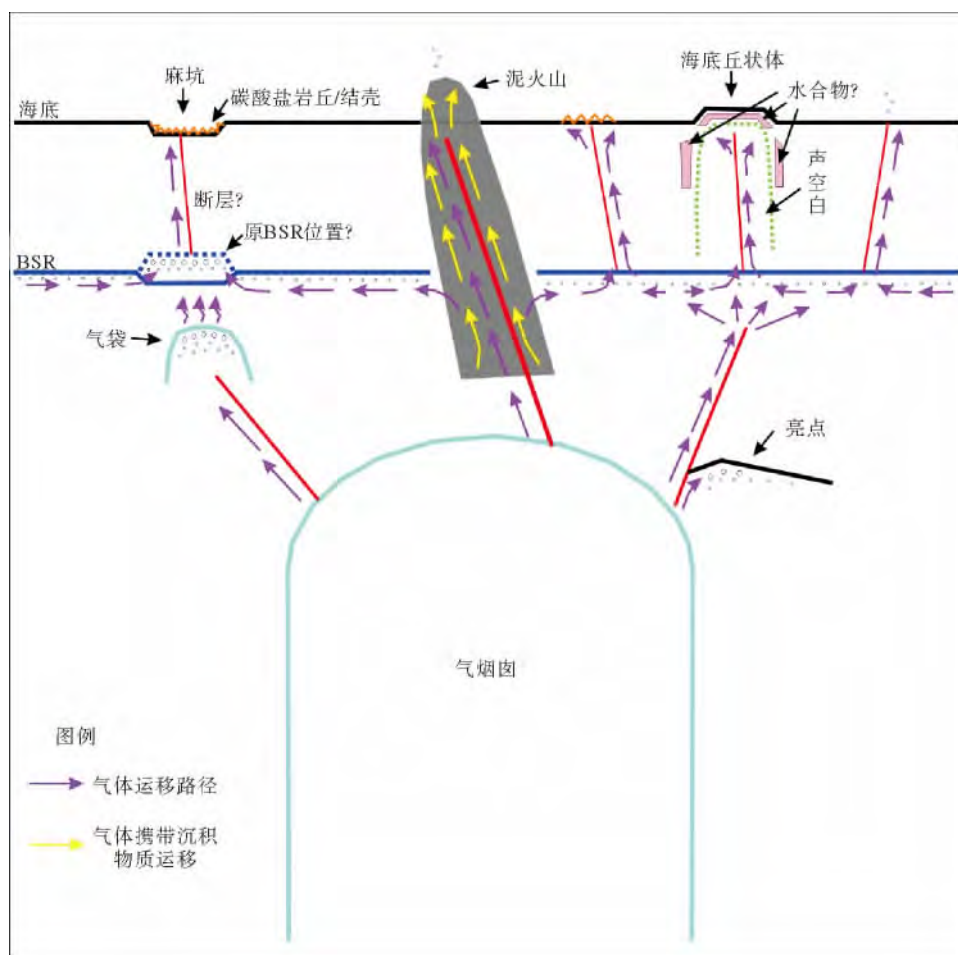


图6 各种微地貌形成过程及天然气渗漏模式

Fig. 6 Formation of various microtopography and the gas seep mode

的赋存状态产生影响,其研究成果表明:快速的天然气渗漏,可形成海底富泥地貌特征(大型泥火山、泥流、泥喷逸),海底缺乏水合物生成;中等速度的天然气渗漏,在海底可形成水合物丘、孤立的自生碳酸盐岩丘,可见到小型冷泉喷逸特征;低速的天然气渗漏,更容易在海底形成自生碳酸盐岩丘、硬底、结核或者矿物化的气烟囱,浅部地层也缺乏大型块状水合物沉积。

研究区内麻坑、泥火山等微地貌,其形成过程可能代表了天然气快速渗漏过程,在海底或浅部沉积物中不易形成浅层块状水合物;这些微地貌形成晚期,发现多与碳酸盐岩底质相伴生,可能代表了晚期缓慢的甲烷渗漏过程,因此可能也缺乏块状水合物沉积。以海底丘状体微地貌为代表的中等天然气渗漏过程,其在浅部地层水合物稳定域内聚集圈闭,形成局部高压含气层,在适当的温压条件下容易形成块状或裂缝充填状的天然气水合物。值得注意的是韩国在 Ulleung 盆地钻取到的块状水合物,其井位大部分位于丘状体下浅部的声空白带顶部^[35]。因

此,以海底丘状体微地貌及声空白反射特征的浅层天然气聚集带,成为块状水合物最理想的发育场所,可能成为南海北部陆坡勘察块状水合物的重要识别标志。

4 结论

(1)对南海东北部陆坡海域采集的浅地层剖面数据、多波束数据、地震剖面数据资料进行综合研究,识别出海底麻坑、海底丘状体、大型海底圆丘、泥火山等与海底天然气渗漏有关的微地貌类型。

(2)麻坑、海底丘状体/大型海底圆丘、泥火山微地貌分别代表了浅覆盖层快速天然气渗漏、浅覆盖层中等速度天然气渗漏和厚覆盖层快速天然气渗漏3种天然气渗漏模式。

(3)具有海底丘状体微地貌及声空白反射特征的浅层天然气聚集带,成为块状水合物最理想的发育场所,可能成为南海北部陆坡勘察块状水合物的重要识别标志。

参考文献(References)

- [1] Judd A G. The global importance and context of methane escape from the seabed[J]. *Geo-Mar Lett*, 2003(23): 147-154.
- [2] Alan Judd, Martin Hovland. Seabed fluid flow Impact of geology, biology and the marine environment[M]. Great Britain at the Alden Press, Oxford, 2007: 58-118.
- [3] Greinert J K B, Lewis C, Bialas J. Methane seepage along the Hikurangi Margin, New Zealand: Overview of studies in 2006 and 2007 and new evidence from visual, bathymetric and hydroacoustic investigations[J]. *Marine Geology*, 2010, 272: 6-25.
- [4] Erwin Suess. Marine Gas Hydrate Research: Changing Views Over The Past 25 Years[R]. Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011), 2011(7).
- [5] Hovland M, Judd A G. Seabed Pockmarks and Seepages: Impact on the Geology, Biology and the Marine Environment [M]. Graham and Trotman, London, 1988.
- [6] Bouriak S, Vanneste M, Saoutkine A. Inferred gas hydrates and clay diapirs near the Storegga Slide on the southern edge of the V ring Plateau, offshore Norway[J]. *Marine Geology*, 2000, 163: 125-148.
- [7] Lüdmann T, Wong H K. Characteristics of gas hydrate occurrences associated with mud diapirism and gas escape structures in the northwestern Sea of Okhotsk[J]. *Marine Geology* 2003, 201: 269-286.
- [8] Gay A, Lopez M, Cochonat P. Evidences of early to late fluid migration from an upper Miocene turbiditic channel revealed by 3D seismic coupled to geochemical sampling within seabed pockmarks, Lower Congo Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23: 387-399.
- [9] Harry H Roberts, Bob A Hardage, et al. Seafloor reflectivity—An important seismic property for interpreting fluid/gas expulsion geology and the presence of gas hydrate[J]. *The Leading edge*, 2006, 6: 620-627.
- [10] Lieven Naudts, Jens Greinert, Yuriy Artemov. Anomalous sea-floor backscatter patterns in methane venting areas, Dnepr paleo-delta, NW Black Sea [J]. *Marine Geology*, 2008, 251: 253-267.
- [11] Lykousis V, Alexandri S, Woodside J, et al. Mud volcanoes and gas hydrates in the Anaximander mountains (Eastern Mediterranean Sea) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26: 854-872.
- [12] Netzeband G L, Krabbenhoft A, Zillmer M. The structures beneath submarine methane seeps: Seismic evidence from Opouawe Bank, Hikurangi Margin, New Zealand[J]. *Marine Geology*, 2010, 272: 59-70.
- [13] Suess E, M E Torres, G Bohrmann R W, et al. Gas hydrate destabilization; enhanced dewatering, benthic material turnover, and large methane plumes at the Cascadia convergent margin[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999a, 170: 1-15.
- [14] MacDonald I R, Sager W W, Peccini M B. Gas hydrate and chemosynthetic biota in mounded bathymetry at mid-slope hydrocarbon seeps; Northern Gulf of Mexico[J]. *Mar Geol*, 2003, 198: 133-158.
- [15] Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates[J]. *Marine Geology*, 2000, 167: 29-42.
- [16] Alexei V Milkov, Roger Sassen. Preliminary assessment of resources and economic potential of individual gas hydrate accumulations in the Gulf of Mexico continental slope[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20: 111-128.
- [17] 孙启良. 南海北部深水盆地流体散逸系统与沉积物变形[D]. 中国科学院海洋研究所, 2011: 91-106. [SUN Qiliang. Focused flow escape system and sediments deformation in deep-water basins of northern South China Sea[D]. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2011: 91-106.]
- [18] 沙志彬, 杨木壮, 梁劲. 等. 南海北部陆坡海底异常地貌特征与天然气水合物的关系[J]. *南海地质研究*, 2003(14): 29-34. [SHA Zhibin, YANG Muzhuang, LIANG Jinqiang, et al. The characteristics of the abnormal physiognomys of seabed related to gas hydrate in north slope, South China Sea[J]. *Geological research of South China Sea*. 2003(14): 29-34.]
- [19] 黄永祥, Erwin Suess, 吴能友, 等. 南海北部陆坡甲烷和天然气水合物地质—中德合作 SO-177 航次成果专报[M]. 北京: 地质出版社, 2008. [HUANG Yongyang, Erwin Suess, WU Nengyou, et al. Methane and Gas Hydrate Geology of the Northern South Chian Sea; Sino-German Cooperative SO-177 Cruise Report [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.]
- [20] Chuang P C. Gas geochemistry study in gas hydrate potential area offshore SW Taiwan. Master Thesis, Natl. Taiwan Univ., Taiwan(in Chinese), 2006: 83.
- [21] 李守军, 初凤友, 方银霞. 南海北部陆坡神狐海域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 Shenhu Area in the northern South China Sea—characteristics of gas hydrate sediment[J]. *Journal Of Tropical Oceanography*. 2010, 29(4): 56-62.]
- [22] 王秀娟, 吴时国. 琼东南盆地块体搬运体系对天然气水合物形成的控制作用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(1): 109-118. [WANG Xiujuan, WU Shiguo. Control of mass transport deposits over the occurrence of gas hydrate in Qiongdongnan Basin[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*. 2011, 31(1): 109-118]
- [23] 赵铁虎, 张训华, 冯京. 海底油气渗漏浅表层声学探测技术[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(6): 149-156. [ZHAO Tiehu, ZHANG Xunhua, FENG Jing. Acoustic detection techniques for seabed hydracarbon seepage[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2010, 30(6): 149-156.]
- [24] Hovland M, Svensen H, Forsberg C F, et al. Complex pockmarks with carbonate-ridges off mid-Norway: Products of sediment degassing[J]. *Marine Geology*, 2005, 218(1-4): 191-206.

- [25] Pilcher R, Argent J. Mega-pockmarks and linear pockmark trains on the West African continental margin [J]. *Marine Geology*, 2007, 244(1-4): 15-32.
- [26] Nelson H, Thor D R, Sandstrom M W, et al. Modern biogenic gas-generated craters (sea-floor pockmarks) on the Bering Shelf, Alaska [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1979, 90(12): 1144-1152.
- [27] Hovland M, Judd A G, King L H. Characteristic features of pockmarks on the North-Sea floor and Scotian Shelf [J]. *Sedimentology*, 1984, 31(4): 471-480.
- [28] Fader G B J. Gas-related sedimentary features from the eastern Canadian continental-shelf [J]. *Continental Shelf Research*, 1991, 11(8-10): 1123-1153.
- [29] Sieck H. Practical application of offshore site hazard surveys [J]. *Ocean Eng (United States)*, 1975, 47(15): 6-9.
- [30] Cifci G, Dondurur D, Ergun M. Deep and shallow structures of large pockmarks in the Turkish shelf, Eastern Black Sea [J]. *Geo-Marine Letters*, 2003, 23(3-4): 311-322.
- [31] Sun Q L, Wu S G, Hovland M, et al. The morphologies and genesis of mega-pockmarks near the Xisha Uplift, South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(6): 1146-1156.
- [32] Young Keun Jin, Young-Gyun Kim, et al. Distribution and expression of gas seeps in a gas hydrate province of the northeastern Sakhalin continental slope, Sea of Okhotsk [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(10): 1844-1855.
- [33] Carles Canet, Rosa Mar a Prol-Ledesma, Paul R Dando. Discovery of massive seafloor gas seepage along the Wagner Fault, northern Gulf of California [J]. *Sedimentary Geology*, 2010, 228: 292-303.
- [34] Lieven Naudts, Marc De Batist, et al. Geo- and hydro-acoustic manifestations of shallow gas and gas seeps in the Dnepr paleodelta, northwestern Black Sea [J]. *The Leading Edge*, 2009, 9: 1030-1040.
- [35] Jong-Hwa Chun, Byong-Jae Ryu, Byeong-Kook Son, et al. Sediment mounds and other sedimentary features related to hydrate occurrence in a columnar seismic blanking zone of the Ulleung Basin, East Sea, Korea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011: 1-14.
- [36] Ginsburg G D, Solovlev V A. Submarine Gas Hydrates. VNIIO Keangeologia [M], St. Petersburg, 1994: 199.
- [37] Ginsburg, G D, Milkov A V, Solovier V A, et al. Gas hydrate accumulation at the H kon Mosby Mud Volcano [J]. *Geo-Mar. Lett*, 1999(19): 57-67.
- [38] Corthay J E. "Delineation of a massive seafloor hydrocarbon seep, overpressured aquifer sands, and shallow gas reservoirs, Louisiana continental slope," Offshore Technology Conf [M], Houston Texas, OTC8594, 1998: 37-53.
- [39] Milkov A, Sassen R. Thickness of the gas hydrate stability zone, Gulf of Mexico continental slope [J], *Marine and Petroleum Geol*, 2000(17): 981-991.
- [40] Naehr T H, Stakes D S, Moore W S. Mass wasting, ephemeral fluid flow, and barite deposition on the California continental margin [J]. *Geology*, 2000b, 28(4): 315-318.

THE MICROTOPOGRAPHIC FEATURES AND GAS SEEP MODEL ON THE SLOPE IN THE NORTHEASTERN SOUTH CHINA SEA

SHANG Jiujing^{1,2}, WU Lushan^{1,2}, LIANG Jinqiang^{1,2}, SHA Zhibin^{1,2}

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou, 510760;

2. Key Laboratory of Marine Mineral Resources MLR, GMGS, 510760)

Abstract: Submarine gas seepage is rather popular in marine environment. It has been found almost in all the oceans. Submarine gas seep could greatly alter the seafloor topography and produce the seeping-related microtopographies. Submarine gas seepage is an indicator of gas hydrate occurrence. Shallowly buried gas hydrate always occur in submarine gas seepage areas. Sub-bottom profiles, multi-beam geomorphologic data, and seismic data on the slope in northeastern South China Sea were interpreted together, and pockmarks, submarine domes, Large-scale submarine hummocks, Mud volcanoes and Authigenic carbonate mounds were identified. Our studies show that the pockmark may indicate a thin-bed and high-speed gas seepage, the submarine dome or large-scale submarine hummock may indicate a thin-bed and midium-speed gas seepage, and the mud volcano may indicate a thick-bed and high-speed gas seepage. Submarine domes together with acoustic blank indicate the areas where gas accumulated in shallow strata and may be favorable for formation of the block-hydrate.

Key words: slope in northeastern South China Sea; gas seep model; submarine microtopographys; gas hydrate