

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.05.006

海洋钻探对甲烷渗漏的影响：以南海北部天然气水合物钻探 GMGS2-16 站位为例

尉建功^{1,2}, 杨胜雄^{1,2}, 梁金强^{1,2}, 陆敬安^{1,2}, 刘胜旋^{1,2}, 张伟^{1,2}

1. 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510760

2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760

摘要: 目前世界上许多国家对海洋天然气水合物开展了调查和试开采, 但是对水合物开发与海底甲烷渗漏之间的关系缺乏了解。本文依托我国第二次天然气水合物钻探航次(GMGS2), 对 GMGS2-16 钻孔开展了两次钻后甲烷渗漏调查。第一次使用水下机器人(ROV)在该孔开钻之前、钻探过程中及完钻 67 天内进行了 4 次海底观察, 其中开钻之前未发现海底甲烷渗漏, 而在完钻后的两次海底观察中, 发现大量气泡从废弃井口冒出。第二次使用船载多波束在该孔完钻 18 个月后开展水体调查, 发现水体中存在火焰状的高回波强度, 表明水体中存在气体羽状流, 指示海底发生了甲烷渗漏。地震剖面显示该站位水合物赋存层下伏游离气, 甲烷渗漏可能是由于钻探打通了海底与该游离气层, 形成了甲烷气体运移的优势通道, 造成海底甲烷渗漏。多波束水体数据显示甲烷气泡从海底溢出, 在海面以下约 650m 处消失, 表明甲烷气体在通过水体的过程中被完全溶解, 因此, 钻探导致的甲烷渗漏对大气的影响较小。未来随着井壁的坍塌以及水合物在井内的形成, 气体运移的优势通道将会完全关闭, 甲烷渗漏终止。

关键词: 甲烷渗漏; 流体运移通道; 天然气水合物钻探; 珠江口盆地; 南海北部

中图分类号: X145

文献标识码: A

Impact of seafloor drilling on methane seepage—enlightenments from natural gas hydrate drilling site GMGS2-16, northern South China Sea

WEI Jiangong^{1,2}, YANG Shengxiong^{1,2}, LIANG Jinqiang^{1,2}, LU Jingan^{1,2}, LIU Shengxuan^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}

1. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510760, China

2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China

Abstract: There are a few countries in the world, which have conducted gas hydrate exploration and test production. However, the knowledge about the impact of seafloor drilling on methane seepage is limited. This study conducted two post seafloor investigations on the GMGS2-16 drilling site of the second gas hydrate drilling expedition (GMGS2). The first investigation consisted of four ROV dives, including one dive before drilling, one dive during drilling and two dives after drilling. The first dive did not find any seafloor gas emission. However, during the last two dives, massive gas bubble emission was observed from the abandoned well. The second investigation was conducted with multibeam echosounder 18 months after the well GMGS2-16A was completed. Flare-shaped high amplitude backscatter was observed in the water column, indicating methane leakage from the seafloor. The seismic profile showed that the free gas was distributed beneath the hydrate-bearing sediment. The seafloor drilling penetrated the hydrate-bearing sediment layer and built up the pathway between seafloor and free gas reservoir, which led to seafloor methane seepage. The water column multibeam data shows that gas flares disappeared at around 650 mbsl, indicating that methane gas was totally dissolved in the seawater. The impact of drilling-induced methane seepage on the atmosphere is quite limited. The methane leakage will stop when the pathways are closed by wall collapse and hydrate deposited later.

Key words: methane seep; fluid migration pathway; gas hydrate drilling; Pearl River Mouth Basin; Northern South China Sea

资助项目: 国家自然科学基金项目“南海北部陆坡天然气水合物结构及气体成因对比研究”(41602149); 国家重点研发计划“4500 米载人潜水器深潜海底冷泉系统科学研究”(2016YFC0304905-03)

作者简介: 尉建功(1984—), 男, 博士, 主要从事天然气水合物地质勘探研究, E-mail: weijiangong007@163.com

收稿日期: 2017-04-19; **改回日期:** 2017-06-16. 蔡秋蓉编辑

天然气水合物是由水和气体分子在高压低温条件下形成的固体化合物,在海洋陆坡沉积物及冻土带中都有广泛分布^[1]。尽管目前对于世界海洋沉积物中水合物储量的估算仍然相差多个数量级^[2,3],但即使最保守的估计也表明天然气水合物是一种极有前景的非常规能源^[4,5];同时,天然气水合物在全球气候变化、陆坡稳定性及全球碳循环中都起着重要的作用^[6-8]。

海洋天然气水合物的开发和利用对科学界及工业界有着巨大的吸引力。目前已经在世界多个海域发现了天然气水合物,如黑海、墨西哥湾、几内亚湾、巴基斯坦陆坡及日本海等^[9-13]。另外,水合物的开发和利用也已经被许多国家上升到战略高度,印度、韩国、日本和中国已经通过钻探对海洋天然气水合物进行了详细的调查和评价^[14-17]。印度国家天然气水合物计划(NGHP)01 航次对印度西海岸的 K-G 盆地开展了多个站位的水合物钻探测井和取心作业,结果表明水合物赋存在 5~8m 厚的砂层中,水合物的饱和度大约为 20%~40%^[18]。韩国于 2007 年和 2010 年在郁陵盆地共开展了两次水合物钻探航次(UBGH,UBGH2)^[19],获得了大量天然气水合物地球物理、地球化学和地质资料^[20,21]。日本在对南海海槽做了大量水合物钻探调查工作后,于 2013 年开展了全球首次海域天然气水合物试开采工程^[22],连续生产 6 天,累计产量 11.9 万 m³。

海底甲烷渗漏是一种常见的自然现象,由于甲烷渗漏而形成的独特深海系统称为冷泉。目前对钻探导致的甲烷渗漏研究最全面的是北海 22/4 井。自从 1990 年 11 月份该井发生大规模浅层气渗漏以来,在 20 多年的时间里人们利用多种手段对该站位开展了大量航次,研究气体渗漏的来源、气体渗漏的周期性和持续性以及气体的最终去向^[23-26]。然而人们对因为水合物钻探而导致的深海气体渗漏却了解较少。

我国高度重视天然气水合物研究和调查工作,自 1999 年我国首次在南海西沙海域发现指示天然气水合物存在的地球物理标志——似海底反射(BSR)以来,广州海洋地质调查局在中国南海开展了多个地球物理、地球化学和地质调查航次,获得了水合物相关基础资料,为中国海域天然气水合物钻探靶区优选及钻后评价提供了重要的数据支撑。随后广州海洋地质调查局于 2007、2013、2015 和 2016 年共开展了 4 次天然气水合物钻探调查航次^[16],通过随钻测井和钻探取心获得了大量测井数据、钻探岩心和水合物样品。为了了解水合物钻探对海底甲

烷渗漏的影响,本研究利用水下机器人(ROV)和多波束水体探测系统对 2013 年 GMGS2 航次的钻探站位 GMGS2-16 进行了多次观测,基于观测数据讨论了气体的来源和渗漏机制,并对甲烷渗漏造成的环境影响进行了初步评估。

1 地质背景

GMGS2 天然气水合物钻探区域位于中国南海珠江口盆地东部,水深 600~2100m。钻探区海底地形复杂,海脊、深海峡谷及海底滑坡在该区域广泛发育(图 1)。研究区断裂及底辟活动强烈,断层主要分为 3 类,包括继承性断层,大型气烟囱上部的小型活动正断层以及深水区的走滑断层^[27]。气烟囱在钻探区广泛发育,尤其是在脊部。通过气烟囱位置与海底地形地貌对比研究,发现气烟囱主要在地形较高的位置发育,这些位置最有利于气体的向上运移。BSR 的发育与气烟囱密切相关,尤其是刺穿浅部地层的大型成熟气烟囱,表明气烟囱是该海区流体向上运移的重要通道。

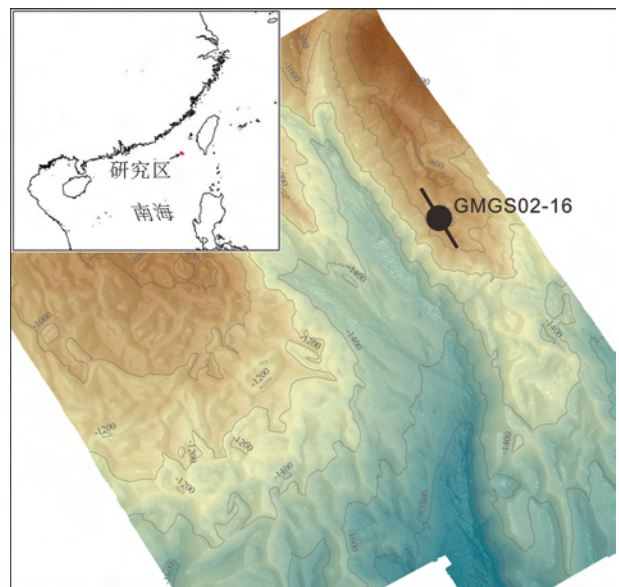


图 1 GMGS2 水合物钻探区的位置及水深地形
(黑点为本次研究的 GMGS2-16 站位,黑线为
图 4 过井剖面的位置。GMGS2
所有的钻探站位可以在文献[28]中找到)

Fig.1 Location map (inset) and bathymetric map of the drilling area in 2013(Black dot shows the location of the drilling site GMGS2-16 in this study. The black line is the track line of the multibeam survey)

2 材料和方法

广州海洋地质调查局在 2013 年通过使用辉固公司的“REM Etive”钻探船在珠江口盆地东部海域开展了第二次天然气水合物钻探(GMGS2),在 13 个站位实施了钻探取心和测井工作,Geotek 公司和斯伦贝谢公司分别负责现场测试和测井工作。本次研究的站位为 GMGS2-16 站位,位于钻探区的脊部(图 1),水深为 869m,在该站位共实施了 8 个钻孔的钻探工作,其中 GMGS2-16A 进行了随钻测井(LWD),钻探深度为 220mbsf; GMGS2-16B~H 实施了钻探取心,最大钻探深度为 212mbsf。除了 16H 与 16A 相距 10m 以上,其他钻孔与 16A 的距离均小于 5m。使用温度传感器对该站位不同深度地层开展了 3 次原位温度测量,目的是为了计算地温梯度。温度传感器在钻至目的层后静置 10 分钟左右,以便达到温度平衡。使用 ROV 在钻前和钻后共开展了 4 次下潜观测。第一次是在 16A 钻孔开钻前,目的是了解海底情况。第二次是在钻探过程中,目的是观察工程施工进展情况,第三次和第四次分别在 16A 钻孔结束后的 60 天和 67 天,目的是对由于钻探造成的甲烷渗漏进行观测。在 2015 年 5 月,即 GMGS2-16A 完钻 18 个月后,广州海洋地质调查局利用“海洋六号”的船载多波束对水体进行探测,评估钻探造成的甲烷渗漏的持续性。

3 结果

3.1 温度梯度

温度传感器 3 次原位温度测量分别位于 51、101 和 205 mbsf,测量结果表明海底温度为 5.34℃。根据测温数据,通过线性回归计算该站位的地温梯度为 34.7℃/km(图 2)。

3.2 测井结果

在 GMGS2-16 站位,测井数据显示由于固结作用,沉积物的电阻率和声波速度随着深度的增加不断增大,分别为 1~1.5ohm.m 和 1500~1650m/s(图 3)。测井曲线显示该站位存在两个正异常值层位,分别位于 12~29mbsf 和 192~201mbsf,表现为高电阻率(最大值分别为 20ohm.m 和 3ohm.m)和高声波速度(最大值分别为 1650m/s 和 1950m/s)。另外,在较深的水合物赋存层段的上方(185~

193mbsf)和下方(201mbsf 以下)存在两个声波速度负异常层。

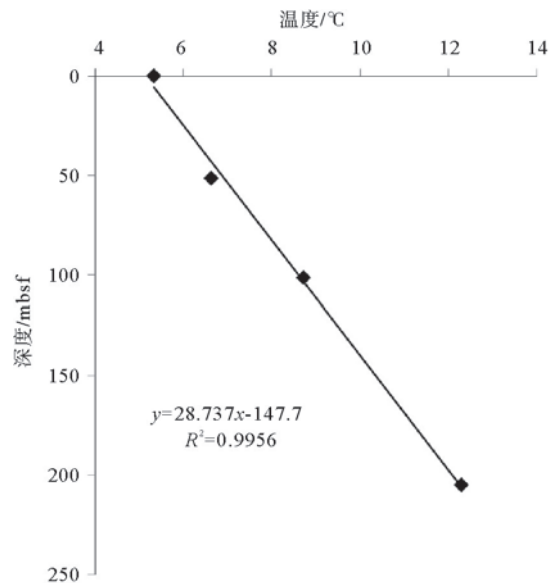


图 2 GMGS2-16 站位原位温度测量值及线性拟合结果
Fig.2 Three in situ temperature measurements at site GMGS2-16

3.3 地震反射特征

0~180mbsf 的沉积物主要由粉砂质黏土构成,地震剖面上除了 150~160mbsf 之间存在明显的地层反射外,其他层位没有明显的岩性变化反射层。虽然测井结果显示浅层沉积物(12~29mbsf)赋存天然气水合物,但在地震剖面上没有指示其存在的明显特征(图 4)。最明显的地震信号异常出现在 180~220mbsf,表现为强振幅反射层,强振幅反射层下部存在声学空白带。另外,该站位剖面显示在 200mbsf 深度存在一系列的微断层和裂缝,有的断层甚至到达了海底(图 4)。

3.4 ROV 观察结果

对 GMGS2-16 站位共开展了 4 次 ROV 下潜观测,为了保证观察的光线质量,同时兼顾观察的范围,ROV 的观察高度通常在离海底 3~5m 左右。第一次下潜在 GMGS2-16A 钻孔开钻之前,观察发现海底表层沉积物为浅灰色软泥,海底呈现凹凸不平的特征(图 5A),没有明显的海底甲烷渗漏。第二次下潜是在 GMGS2-16A 井钻探过程中,整个钻进过程中未发现明显的气体渗漏,但在完钻之后刷井眼的过程中发现有少量气泡从井眼溢出并沿钻杆

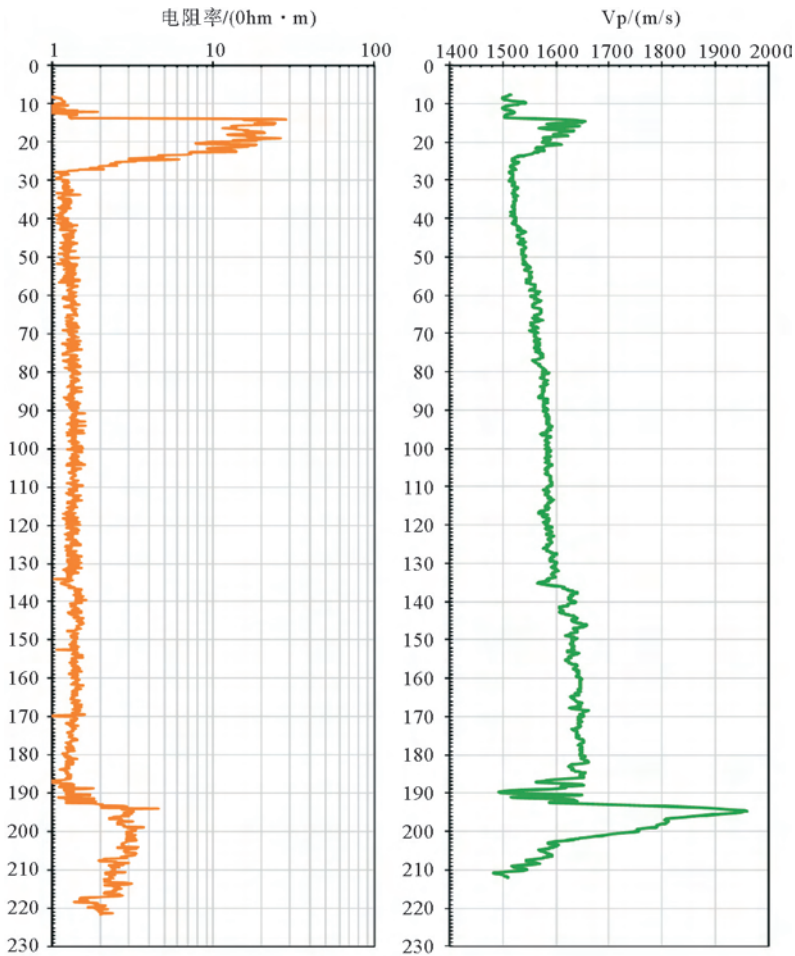


图 3 GMGS2-16 站位随钻测井的电阻率和 P 波速度曲线
Fig.3 LWD data of electrical resistivity and P-wave velocity at site GMGS2-16

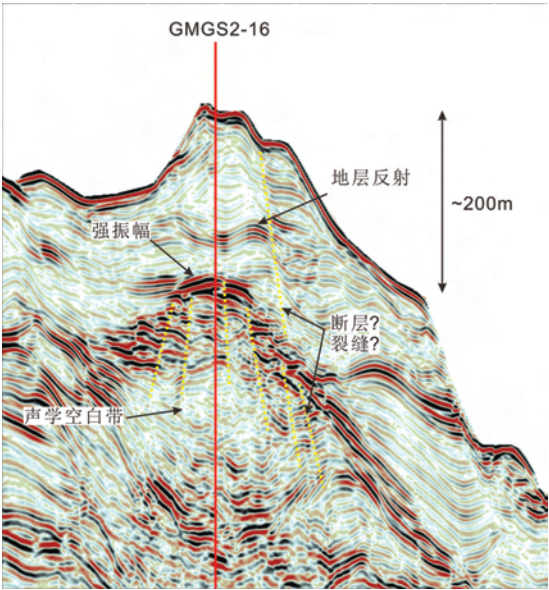


图 4 过 GMGS2-16 井地震剖面(红线表示 GMGS2-16 井位置,其长度不表示该站位钻探深度)
Fig.4 Seismic profile through drilling site GMGS2-16
(The orange line only shows the location of the drilling site and does not represent the penetration depth)

向上运移(图 5B)。第三次下潜是在 GMGS2-16A 站位完钻 60 天后进行的,观测发现气体不断从 GMGS2-16A 钻孔渗漏出来(图 5C 和 D),初步估计渗漏速率在 1~2L/min,同时钻孔处的海底已经不是刚刚完钻时由泥浆和岩屑形成的丘状体,而是呈现海底基座的方形凹陷印迹(~4m)(图 5C)。第四次下潜是在完钻 67 天后,即 16H 钻孔完钻前进行的,观测发现 16A 气体渗漏已经停止,但 16D 开始渗漏(图 5E),在海底基座离开海底后 16H 钻孔也开始出现气体渗漏。

3.5 多波束水体观测

多波束水体调查是在 GMGS2-16A 钻孔结束 18 个月后进行。结果显示水体中存在强振幅反射的气体羽状流,羽状流从海底开始一直延伸至海面以下 650m 左右消失(图 6A 和 B),其高度最大可达~220m。羽状流的形状由于受到海流的影响而发生弯曲变形。通过将水体羽状流的位置投影到地形图上,发现水体羽状流的位置与 GMGS2-16 站

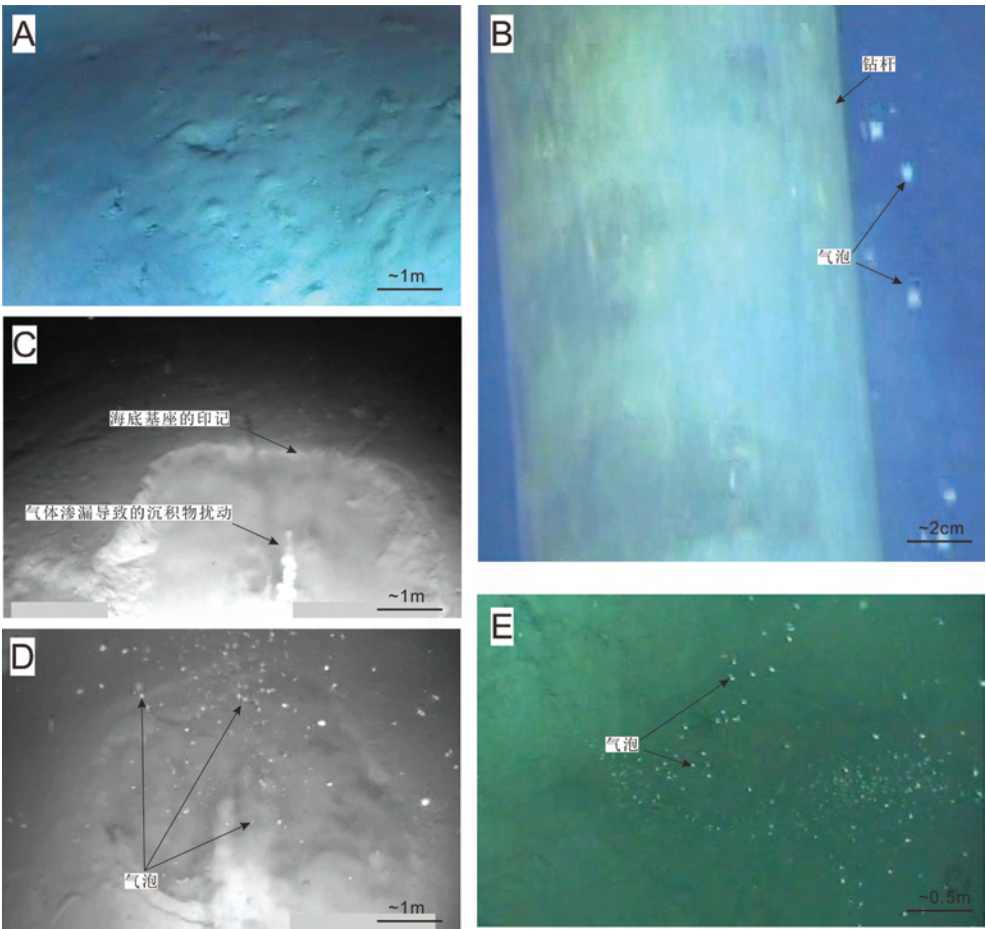


图 5 A: 钻探开始前的 ROV 海底观察; B: 钻探结束后刷井眼过程中 ROV 观察发现有气泡冒出;
C 和 D: 16A 完钻 60 天后的 ROV 海底观察; E: 16A 完钻 67 天后的 ROV 海底观察

Fig.5 A: ROV seafloor observation before drilling (the first dive); B: ROV seafloor observation at the end of the drilling (the second dive); C and D: ROV seafloor observation 60 days after hole completion (the third dive);
E: seafloor observation 67 days after hole completion (the fourth dive)

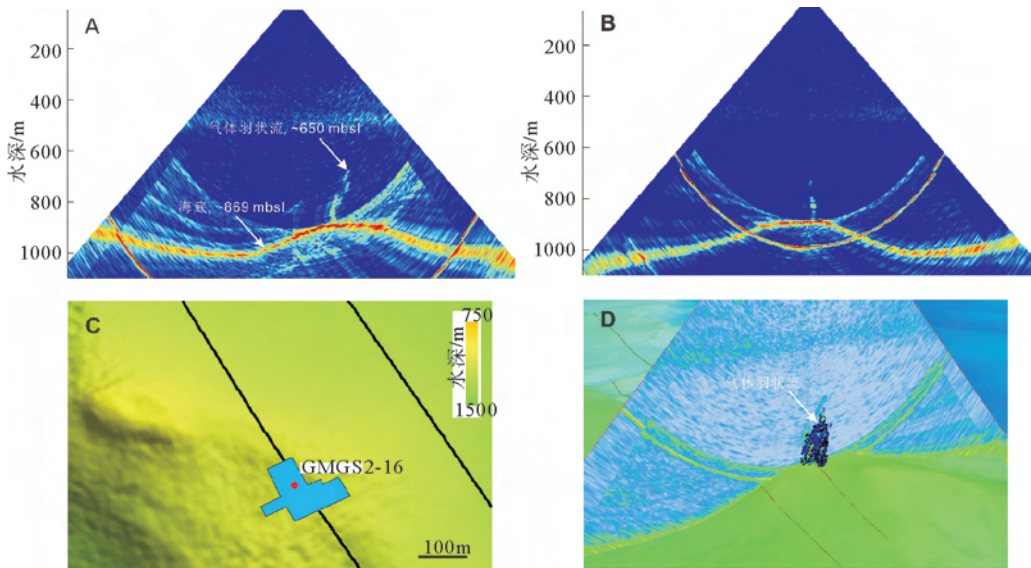


图 6 A 和 B 为多波束调查发现的水体羽状流; C 为水体羽状流区域(蓝色)与 GMGS2-16 井位的位置关系,
黑线为调查船行驶路线; D 为水体多波束与海底地形的三维视图

Fig.6 A and B: Multibeam data showing gas flares from the seafloor into the water column; C: projection of gas flare locations and site GMGS2-16 on the bathymetric map; D: 3D view of water column multibeam data and seafloor topography

位的钻孔位置吻合(图 6C 和 D)。

4 讨论

4.1 气体的来源

基于水合物气体组成分析和激光拉曼分析,该区水合物为生物成因气的 I 型天然气水合物。本文计算了纯甲烷的 I 型水合物在 3.5% NaCl 海水中的稳定性(图 7)。

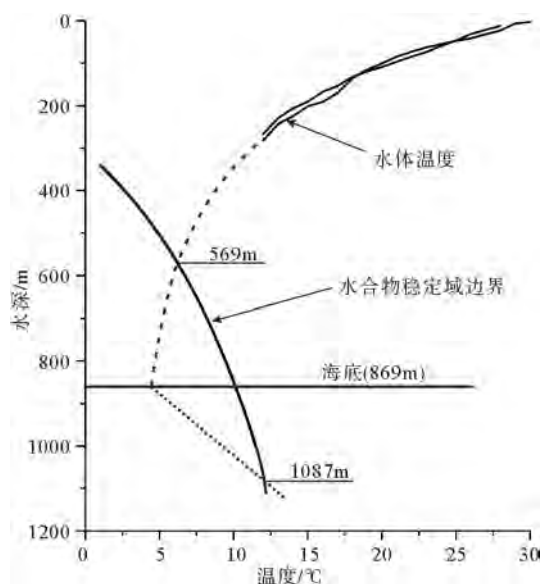


图 7 I 型纯甲烷水合物在 3.5% NaCl 海水中的稳定域
Fig.7 Gas hydrate stability tracts calculated based on sl hydrate, pure methane and 3.5% salt water

测井曲线在 12~29mbsf 和 193~201mbsf 表现为高电阻率和高声波速度,指示这两个层位存在水合物,而在 185~193mbsf 和 201mbsf 以深表现为高电阻率和低声波速度,表明该层位存在游离气。地震剖面显示在 180~220mbsf 存在强振幅反射层,即似海底反射层(BSR),指示存在游离气体,这与测井解释的结果是一致的。然而通过计算 GMGS2-16 站位水合物稳定存在的相平衡边界顶部和底部分别为 569mbsl 和 1087mbsl(218mbsf),因此,理论上 218mbsf 以上甲烷应该以水合物的形式存在,而不是游离气,但测井和地震数据都显示 218mbsf 以上存在游离气,推断该站位 185~193mbsf 和 201mbsf 以深可能存在气泡状水合物,即水合物与游离气共存的一种形态。Wei^[11]和 Sultan^[29]发现水合物稳定域中水合物和游离气可以

以气泡状水合物的形式存在,即以水合物为外壳的甲烷气泡^[30]。水合物壳不仅将水和甲烷气体有效隔离,降低水合物进一步形成的速率,同时抑制了气体的进一步运移,强振幅反射主要是由气泡状水合物造成的^[29]。气泡状水合物的形成主要是由于气体的快速运移、积聚以及水合物的快速形成导致的^[31]。钻探区气烟囱十分发育,这些气烟囱在地震剖面上通常表现为声学空白带^[27],而在气烟囱的顶部和侧部通常会形成裂缝,从而为气体运移提供有效通道^[11]。深部水合物层的顶部位于 193mbsf,根据 PCATS 三轴测试获得的渗透率数据显示该层渗透率极低,有可能为下伏流体和游离气提供了有效的盖层。推断 GMGS2-16 站位由于钻探到达了游离气层(水合物稳定域的底部)或者富含游离气的地下水层,构建了海底与游离气层的优势通道,最终游离气在高压作用下通过井眼快速向上运移,进入水体形成海底甲烷渗漏。

4.2 甲烷渗漏及其可持续性

钻探导致的甲烷渗漏是一个动态的体系。第四次 ROV 海底观察发现 16A 停止渗漏,而 16D 开始渗漏。从地震剖面及两个钻孔的相对位置来看,16A 与 16D 甲烷渗漏的气体应该来自于同一个游离气层,当其中的一个井眼的渗透率降低或者由于大量释气造成游离气层局部压力降低时,流体会选择从另一条通道运移,形成甲烷渗漏。

渗漏甲烷对大气的影响很小。多波束数据显示水体羽状流绝大多数都在 650mbsl 处消失,当甲烷气体从海底溢出进入水体,甲烷气泡的表面会迅速形成一层水合物壳体将气体包裹,这层水合物壳体可以有效的降低甲烷气溶解的速率,从而延长其在水体中的时间^[32,33]。在水合物壳的保护下,气泡不断向上运移,随着压力的降低和温度的升高,气泡最终离开水合物稳定的相平衡边界顶部,此时,水合物壳体会迅速溶解,而在缺少保护的情况下,甲烷气体也会迅速溶解在水体中^[33],因此,基本上没有甲烷以气体的形式进入大气中。钻探刺穿低渗透率的水合物赋存层有利于游离气在压力作用下沿井眼快速向上运移,然而这种由钻探导致的甲烷渗漏会最终停止。首先,随着时间的推移在沉积物应力及孔隙水压力作用下井壁会不断坍塌从而降低通道孔隙,其次水合物在井壁和裂缝中的形成会进一步降低孔隙度^[29],最后随着气体的不断释放,气层中的压力不断减小,当压力减小至与水体压力相同时,甲烷渗漏就会停止。因此,钻探导致的甲烷渗漏并不

是永远存在的。

5 结论

(1) GMGS2-16 站位的海底甲烷渗漏主要来自于水合物赋存层的下伏游离气。水合物钻探刺穿了低渗透率的水合物赋存层,形成了海底与游离气层的有效运移通道,导致下伏游离气在高压作用下沿井眼迅速向上运移,最终溢出海底形成甲烷渗漏;

(2) 甲烷气体从海底渗漏到水体,形成水体羽状流,羽状流的顶部在海面以下 650m 处,表明没有甲烷以气体的形式进入大气;

(3) 由于井壁的坍塌和水合物的形成,气体运移的通道会最终封闭,天然气水合物钻探导致的海底甲烷渗漏不是永久的。

参考文献 (References)

- [1] Sloan Jr E D, Koh C. Clathrate Hydrates of Natural Gases [M]. CRC Press, 2007.
- [2] Klauda J B, Sandler S I. Global distribution of methane hydrate in ocean sediment[J]. Energy & Fuels, 2005, 19(2): 459-470.
- [3] Milkov A V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? [J]. Earth-Science Reviews, 2004, 66(3-4): 183-197.
- [4] Lee S Y, Holder G D. Methane Hydrates Potential as a Future Energy Source[M]. Fuel Processing Technology, 2001, 71(1-3): 181-186.
- [5] Moridis G J, Collett T S, Boswell R, et al. Gas Hydrates as a Potential Energy Source: State of Knowledge and Challenges, in Advanced Biofuels and Bioproducts[M]. Advanced Biofuels and Bioproducts, Springer, 2013: 977-1033.
- [6] Katz M E, Pak D K, Dickens G R, et al. The source and fate of massive carbon input during the latest Paleocene thermal maximum[J]. Science, 1999, 286(5444): 1531-1533.
- [7] Maslin M, Mikkelsen N, Vilela C, et al. Sealevel and gashydrate controlled catastrophic sediment failures of the Amazon Fan[J]. Geology, 1998, 26(12): 1107-1110.
- [8] Dickens G R. Rethinking the global carbon cycle with a large, dynamic and microbially mediated gas hydrate capacitor[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 213(3-4): 169-183.
- [9] Klaucke I, Sahling H, Weinrebe W, et al. Acoustic investigation of cold seeps offshore Georgia, eastern Black Sea[J]. Marine Geology, 2006, 231(1-4): 51-67.
- [10] Klapp S A, Bohrmann G, Kuhs W F, et al. Microstructures of structure I and II gas hydrates from the Gulf of Mexico[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(1): 116-125.
- [11] Wei J, Pape T, Sultan N, et al. Gas hydrate distributions in sediments of pockmarks from the Nigerian margin - Results and interpretation from shallow drilling[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 59: 359-370.
- [12] Bourry C, Chazallon B, Charlou J L, et al. Free gas and gas hydrates from the Sea of Marmara, Turkey: Chemical and structural characterization[J]. Chemical Geology, 2009, 264(1-4): 197-206.
- [13] Römer M, Sahling H, Pape T, et al. Quantification of gas bubble emissions from submarine hydrocarbon seeps at the Makran continental margin (offshore Pakistan)[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117(C10).
- [14] Dewangan P, Sriram G, Ramprasad T, et al. Fault system and thermal regime in the vicinity of site NGHP-01-10, Krishna - Godavari basin, Bay of Bengal[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(10): 1899-1914.
- [15] Kim G Y, Yi B Y, Yoo D G, et al. Evidence of gas hydrate from downhole logging data in the Ulleung Basin, East Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(10): 1979-1985.
- [16] Yang S, Liang J, Lei Y, et al. GMGS4 gas hydrate drilling expedition in the South China Sea[J]. Fire In The Ice, 2017, 17(1): 7-11.
- [17] EIA U. Annual energy outlook 2013[J]. US Energy Information Administration, Washington, DC, 2013: 60-62.
- [18] Riedel M, Collett T, Shankar U. Documenting channel features associated with gas hydrates in the Krishna - Godavari Basin, offshore India[J]. Marine Geology, 2011, 279(1-4): 1-11.
- [19] Li X S, Xu C G, Zhang Y, et al. Investigation into gas production from natural gas hydrate: A review[J]. Applied Energy, 2016, 172: 286-322.
- [20] Kim J H, Torres M E, Hong W L, et al. Pore fluid chemistry from the Second Gas Hydrate Drilling Expedition in the Ulleung Basin (UBGH2): Source, mechanisms and consequences of fluid freshening in the central part of the Ulleung Basin, East Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 47: 99-112.
- [21] Horozal S, Kim G Y, Bahk J J, et al. Core and sediment physical property correlation of the second Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition (UBGH2) results in the East Sea (Japan Sea) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 59: 535-562.
- [22] Yamamoto K. Overview and introduction: Pressure core-sampling and analyses in the 2012 - 2013 MH21 offshore test of gas production from methane hydrates in the eastern Nankai Trough[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 66: 296-309.
- [23] Leifer I, Solomon E, von Deimling J S, et al. The fate of bubbles in a large, intense bubble megaplume for stratified and unstratified water: Numerical simulations of 22/4b expedition field data[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 68: 806-823.
- [24] Judd A. The significance of the 22/4b blow-out site methane emissions in the context of the North Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 68: 836-847.

- [25] Vielstädte L, Karstens J, Haeckel M, et al. Quantification of methane emissions at abandoned gas wells in the Central North Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 68: 848-860.
- [26] Wiggins S M, Leifer I, Linke P, et al. Long-term acoustic monitoring at North Sea well site 22/4b[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 68: 776-788.
- [27] Sha Z, Liang J, Zhang G, et al. A seepage gas hydrate system in northern South China Sea: Seismic and well log interpretations[J]. *Marine Geology*, 2015, 366: 69-78.
- [28] Zhang G, Liang J, Lu J A, et al. 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[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 67: 356-367.
- [29] Sultan N, Bohrmann G, Ruffine L, et al. Pockmark formation and evolution in deep water Nigeria: Rapid hydrate growth versus slow hydrate dissolution[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(4): 2679-2694.
- [30] Bohrmann G, Torres M E. Gas Hydrates in Marine Sediments, in *Marine Geochemistry* [M]. Springer, 2006: 481-512.
- [31] Torres M, Wallmann K, Tréhu A, et al. Gas hydrate growth, methane transport, and chloride enrichment at the southern summit of Hydrate Ridge, Cascadia margin off Oregon[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 226 (1-2): 225-241.
- [32] McGinnis D F, Greinert J, Artemov Y, et al. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, 111(C9).
- [33] Rehder G, Brewer P W, Peltzer E T, et al. Enhanced lifetime of methane bubble streams within the deep ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(15): 21-1-21-4.