

李 昂, 蔡 峰, 李 清, 等. 浅表层泥火山型天然气水合物成藏地质模型[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(9): 94-100.

浅表层泥火山型天然气水合物成藏地质模型

李 昂^{1,2}, 蔡 峰^{1,2*}, 李 清^{1,2}, 闫桂京^{1,2}, 孙运宝^{1,2}, 董 刚^{1,2}, 骆 迪^{1,2}

(1 自然资源部天然气水合物重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

2 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071)

摘 要: 深海环境泥火山活动为甲烷从深部向浅部迁移提供了搬运介质和通道, 泥火山附近天然气水合物成藏具有独特的形成过程和富集规律。泥火山型水合物资源潜力和环境影响的理论假设已被提出, 而在工程实施阶段的论述相对较少。本次研究通过调研世界范围内典型海域泥火山-天然气水合物系统研究进展和赋存规律, 结合我国海域泥火山的调查成果, 归纳出泥火山型天然气水合物赋存地质模型。之后分析该模型组成要素的地质记录, 获得识别泥火山型天然气水合物的 3G 异常标志, 总结出该类型水合物实用的勘探思路。

关键词: 泥火山; 天然气水合物; 3G 异常; 成藏地质模型

中图分类号: P744; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.065

0 引言

泥火山是地下(2~5 km)超压孔隙流体和含黏土沉积物通过垂向运移通道在地表或海床喷出后所形成的圆锥状或饼状沉积体, 广泛的发育在陆地和海域中^[1]。在海域中泥火山的分布、规模、形成机制和造成的环境影响与麻坑和冷泉地质系统类似, 它们有时被认为是孔隙流体排出地质过程在不同时空条件下所形成的不同地质表征^[2-3]。在大范围海域中寻找深水泥火山可以通过以下资料: ①海底地貌和水下图像数据呈现的似圆形凸起^[4]; ②地震剖面中呈现圆柱状异常反射特征的垂向运移通道及其岩心样本中出现的泥角砾^[5]; ③上述现象上方水体中出现的束状气泡或羽状流^[1, 6]。

泥火山作为深海环境中连接岩石圈和水圈的通道, 物质在其中的转移为我们提供了研究深部地

质条件和过程的媒介^[7]。泥火山喷出物通常携带有大量以甲烷为主的烃类气体, 无论这种排气方式是间歇性还是事件性的, 作为第三大温室效应气体, 排出的甲烷都有可能进入到大气中从而加剧温室效应^[8-9]。此外, 泥火山可以指示海床下常规油气以及天然气水合物储层^[10-11], 这是因为深水环境下泥火山周围的温度压力条件通常能够使水合物稳定赋存, 而且泥火山形成过程中的垂向通道会将深部孔隙水和烃类气体运移至浅部水合物稳定区域, 这两种物质都是水合物形成所必需的^[12-15]。初步计算结果表明储存在泥火山-水合物系统中的甲烷体积约为 $10^{10} \sim 10^{12} \text{ m}^3$ ^[9, 16]。在泥火山中已发现有水合物存在的地区包括巴伦支海、鄂霍茨克海、里海、黑海、地中海、加勒比海、巴巴多斯海域、尼日利亚海域、墨西哥湾和南极半岛^[17]。

笔者首先总结世界范围内典型泥火山-水合物系统及其地质表征, 结合我国海域泥火山调查成果, 重点归纳出浅表层泥火山型天然气水合物成藏模式, 之后尝试建立该类型水合物矿藏抓点找环的勘探思路。

1 典型泥火山-水合物系统

1.1 巴伦支海

位于北冰洋巴伦支海的 Håkon Mosby 泥火山

收稿日期: 2020-05-30

资助项目: 国家重点研发计划(2018YFC0310001); 山东省自然科学基金(ZR2019BD014); 中国博士后科学基金(2018M630762); 国际博士后交流计划引进项目

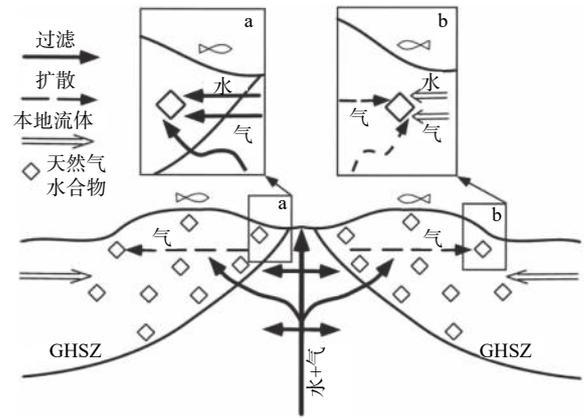
作者简介: 李 昂(1987—), 男, 博士, 主要从事天然气水合物成藏机理、甲烷渗漏及深海沉积方面的研究工作。E-mail: ang.li_cn@outlook.com

* 通讯作者: 蔡 峰(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事油气地质与天然气水合物方面的研究工作。E-mail: caifeng0532@163.com

(72°00'N, 14°43'E)研究程度较高,是反映泥火山和水合物关系最典型的实例。该泥火山水深为 1 250 m,平面上呈近圆形,直径约为 1 km,高出周围海床 <10 m,具有很高的地温梯度(>25 °C /m),泥流在中央供给通道中上升的速率>4 m/a,侧向泥流的运移速率可达 0.4 m/day,泥火山顶部有大量的甲烷和二氧化碳排出。泥火山口周围存在有固结的泥岩,其中赋存有丰富的水合物,呈现出圆丘状的几何形态,其上方被管虫所覆盖,水合物为 I 型,饱和度可达 21.3%^[18]。在该泥火山及其周围可经常观察到气体释放,在上覆水体中也可以观测到羽状流^[19]。Milkov^[10] 基于 Håkon Mosby 泥火山的观察和分析提出了泥火山-水合物系统模型(图 1),在该模型中水合物出现在泥火山当中及其周围,以同心圆带状分布。由于在泥火山中央通道处温度较高水合物通常不会出现于此,此处孔隙流体包含着溶解或游离的气体,在温度下降时气体溶解度会随之下降,此时可能会有水合物形成。在泥火山周围,沉积物孔隙中的气体会通过扩散的方式从中央通道向四周运移,除了来自于深部的气体,地层浅部的生物成因气体也会参与到水合物形成过程中去,这一过程类似于常规矿物形成的交代过程。

1.2 日本海

日本海水合物勘探将海底凸起、冷泉、气烟囱等地质体一同视为浅表地层潜在目标,其研究指出该种类型水合物声学剖面及海底特征酷似泥火山,但严格来讲并非海底泥火山系统^[20]。日本海高分辨率三维地震数据显示日本海东缘发育有 1 700 多个气烟囱,部分位于海底凸起下方,直径为数百米



gas hydrate stability zone(GHSZ)—水合物稳定区域

图 1 Håkon Mosby 泥火山-水合物系统模式图,水热过程和交代过程分别在泥火山中央部分(a)和周围(b)较为显著(据文献[10]修改)

Fig.1 Schematic representation of the Håkon Mosby mud volcano – gas hydrate. Hydrothermal and metasomatic processes dominate the central part (a) and the peripheral part (b) of the mud volcano, respectively (modified from reference [10])

至上千米,其两侧反射特征清晰且成层,其顶部是由通量较高的甲烷渗漏所形成的碳酸盐岩、菌垫以及化能合成生物群落,上方水体偶见游离气泡和羽状流,BSR 深度为海下方 135~150 m,与气烟囱相交部分出现上拉,其幅度可高达 80 ms(图 2),该地物现象是由气烟囱内部存在高速物质所导致。随钻测井数据表明,该海域水合物并非以细粒状充填在海洋沉积物孔隙当中,而是以结节状、透镜状或块状出现在气烟囱结构泥岩当中。在 J24 站位,厚层块状水合物出现在海底下 10~45、50~70 及 80~115 m 位置,在水合物稳定带附近出现有少量泥和水合物互层,其中,出现 1.5 m 长度异常伽马值(接近 0)和高速数值(~3 000 m/s)部分,对应的天

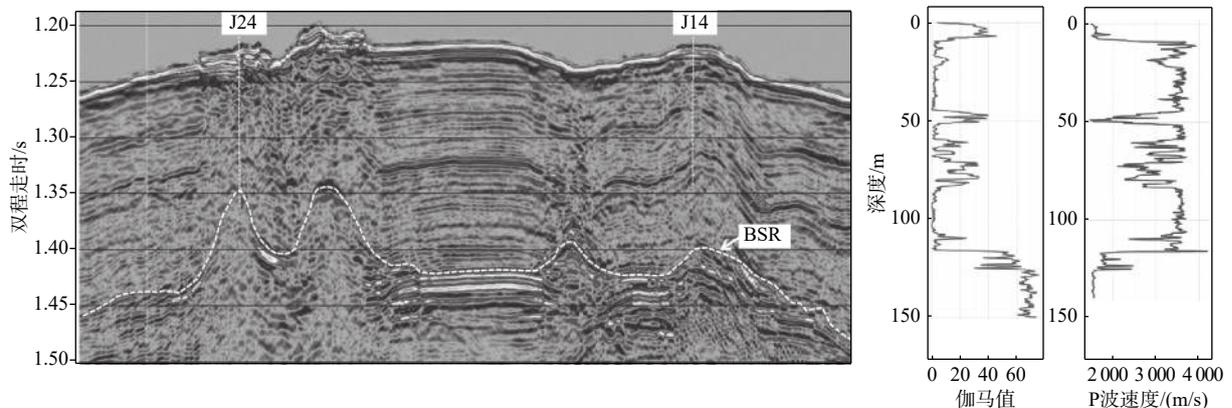


图 2 日本海典型地震剖面及随钻测井数据(据文献[21]修改)

Fig.2 Representative seismic section and LWD data in the Sea of Japan(modified from reference [21])

然气水合物饱和度接近 100%。地化分析表明,日本海水合物气源成因类型随地域变化较大,其分解形成的烃类物质为微生物成因、热解成因以及两者的混合^[21]。

1.3 哥斯达黎加海域

SO144 科研航次发现了位于哥斯达黎加岛弧前的 Mound 11 泥火山(8°55'N, 84°18'W)^[22], 随后 M54-2 科研航次确认了该泥火山中存在的天然气水合物。该泥火山处于主动大陆边缘背景下, 水深约 1 000 m, 直径约 300 m, 高度约为 20 m, 顶部覆盖有大量的碳酸盐岩和零散的细菌垫。地震剖面上可见拟海底反射层(BSR)位于海床下 340 m, 泥火山下方热孔隙流体的垂向运移导致了水合物稳定带底界面的向上弯曲^[23]。重力取样 GC109 显示近海床沉积物有 2 个岩性单元, 上部为橄榄绿含砂黏土岩并伴有含钙泥角砾, 该部分可见充填有含砂泥岩和碳酸盐岩的河道沉积, 下部单元为匀质的粉砂质黏土和钙质薄层互层, 似冰状的水合物出现在下部单元, 与上覆钙质层相比水合物层倾斜 45°, 通过密度数据可以估算出此处的水合物含量最高可到 60%。储存在该泥火山附近的水合物大部分都是甲烷水合物, 地化数据表明甲烷是来自于地下深处的有机质降解, 硫酸盐和甲烷的消耗、硫化氢的形成以及碱性升高说明了甲烷厌氧氧化作用的存在。Schmidt 等^[22] 在综合了地物、地化数据和取样结果提出了如图 3 所示的模型, 在该模型中低氯含量、富含甲烷的地下深部流体通过断层运移至浅部地层并穿过水合物稳定区域到达海床表面, 这一流体外排通过了泥火山中央通道, 由于这一外排作用海床附近的对流单元会使海洋底部水进入到泥火山附近沉积物当中。在这一过程中, 自生碳酸盐岩的成岩区域底界面会变深, 水合物稳定区域顶界面也随之变深。

1.4 鄂霍茨克海

鄂霍茨克海萨哈林岛海域存在着泥火山(例如 Piltunsky 泥火山)和大量的羽状流(例如 Giselle 羽状流), 这些羽状流沿着大型走滑断层分布, 高度为 90~500 m, 多次调查证实了它们的频繁出现, 这都说明了该海域活跃的浅层气体运移和海床气体排出^[24]。Luan 等^[25] 通过侧向扫描声呐发现有一丘

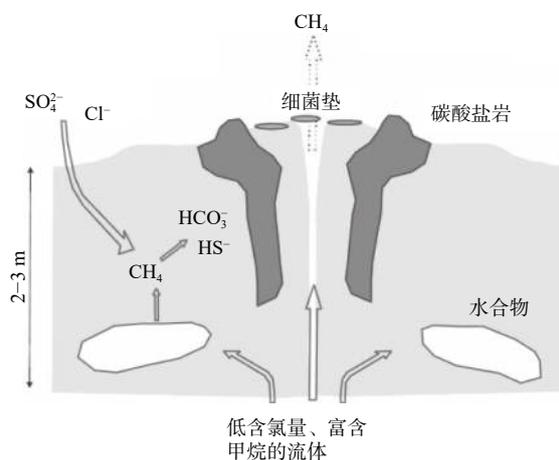


图 3 哥斯达黎加海域 Mound 11 泥火山流体运移模式 (据文献 [22] 修改)

Fig.3 Sketch of fluid flow at Mound 11 mud volcano on the continental slope of Costa Rica (modified from reference [22])

状突起发育在该海域海床上(54°27' N, 144°14' E), 该构造形态上不对称, 水深为 880 m, 直径约为 600 m, 高度约为 40 m, 其顶部泥火山口直径为 12 m, 深度为 4 m, 此处进行了重力取样(LV39-25H), 样品显示岩性为含黏土粉砂岩, 含有双壳贝壳、自生碳酸盐岩, 该样品中赋存有天然气水合物(图 4), 水合物以白色薄片状不连续的分布在样品中, 厚度 1~2 cm, 宽度 2~5 cm, 饱和度估计约为 5%。

1.5 中国海域

中国海域中广泛存在海底游离气逃逸现象, 会形成诸如泥火山等一系列深海地质系统, 勘探初期在大范围海域中识别泥火山主要依靠不同频率声学数据所提供的水体、海底及沉积物信息, 这些地球物理数据可以刻画泥火山-水合物系统, 其表征包括水体中出现的甲烷羽状流、海底微地貌凸起及反射/后向散射强度异常和沉积物中异常声学反射带(图 5), 但目前并无泥角砾资料支撑泥火山地质系统的准确界定。上述数据表明, 中国海域深海泥火山表征与世界范围内主动大陆边缘附近发育的泥火山较为类似。该系统中天然气水合物分布位置是通过地震和少量钻井资料分析所得的, 结果表明, 中国海域泥火山系统中天然气水合物在平面上主要出现在中央通道外缘附近, 距泥火山数百米处便很难发现, 水合物偶尔以细粒充填在粉砂中, 多数呈块状分布于未固结泥岩当中。此外, 对这些泥火山附近孔隙水及顶气甲烷进行地球化学分析, 结果

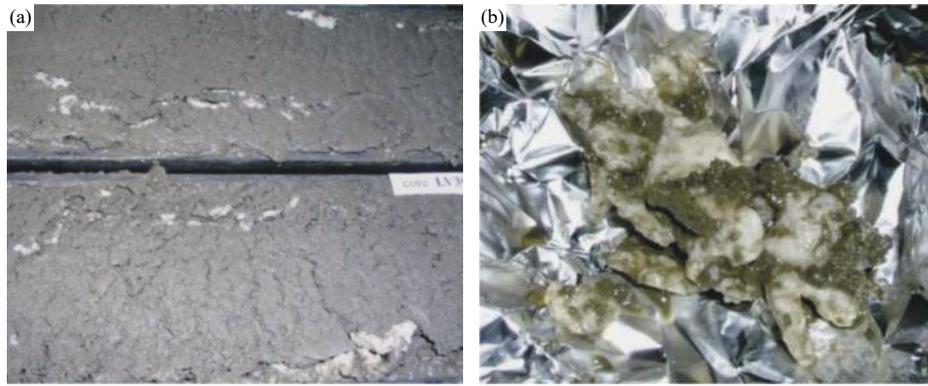


图 4 鄂霍茨克海 LV39-25H 采样观察到的水合物 (据文献 [25] 修改)

Fig.4 Gas hydrates sampled at LV39-25H in the Okhotsk Sea (modified from reference [25])

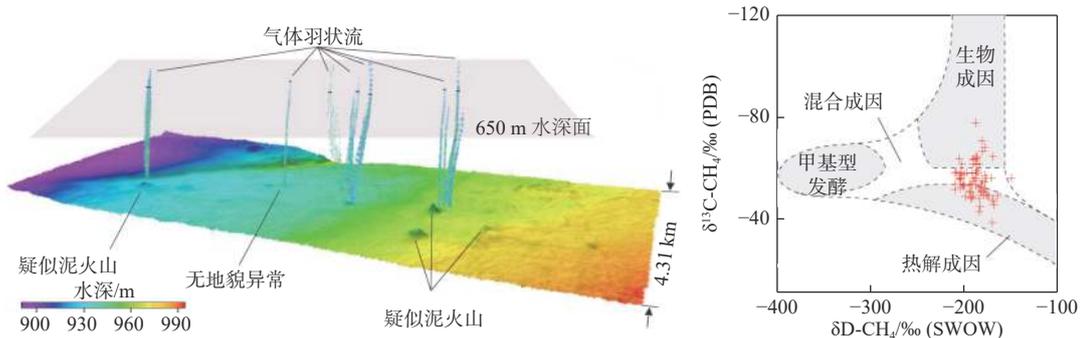


图 5 中国海域泥火山海底地貌及其气源分析

Fig.5 Bathymetric morphology of the mud volcano and analysis of its gas source in the sea areas of China

表明, 泥火山外缘存在有溶解态甲烷渗漏^[26-27], 且水合物中烃类气体成因类型为微生物成因、热解成因以及两者的混合(图 5)。

2 泥火山型天然气水合物成藏模式与勘探思路

2.1 泥火山型天然气水合物地质模式

通过上述调研, 可以看出浅表层泥火山-水合物系统是高通量甲烷自沉积物排出这一地质过程的产物, 热解、微生物及其混合成因的以甲烷为主的气体会在构造等地质作用提供的驱动力下向浅部运移, 该运移通常伴随着孔隙超压和高角度裂隙。甲烷喷出会在海底形成似锥状凸起和单个/若干喷口, 前者形成源于喷出液化沉积物的不断堆积, 通常伴随有泥底辟塑性泥质流的强烈上侵, 后者间歇性的开闭会导致泄漏的气泡羽状流会随时间而变化。富甲烷孔隙流体的对流主要发生在裂隙内部,

通量较高, 同时由于浓度差甲烷会向围岩扩散, 形成的硫酸盐甲烷界面(SMI)由中央部分向四周逐渐变深, 该界面上方发生的甲烷厌氧氧化作用(AOM)会为自生碳酸盐岩的发育提供物质基础。此外, 从深部快速运移至此的孔隙流体通常具有较高的温度, 这会影响局部水合物稳定带的厚度, 其底部(BHSZ)在通道附近会向上拱起, 形成的封盖外形可能会为游离气富集提供圈闭。泥火山系统中天然气水合物多数以团块状分布于通道附近泥岩之中, 厚度从几厘米至几米不等, 其饱和度会通常较高, 向周围地层逐渐降低直至消失, 其范围通常为数百米不等, 且随着变浅该范围会变小, 在剖面上会呈现类似圣诞树的结构(图 6), 而在空间上潜在水合物储层会形成下大上小类似环状的外形。

总体来说, 泥火山型天然气水合物具有范围小、饱和度高、埋藏深度浅的特点。不同于常规油气藏着眼于生、储、盖、圈、运、保的时空匹配, 泥火山型天然气水合物更加侧重研究成藏过程中运移和汇聚方面, 强调硫酸盐还原-甲烷厌氧氧化带、天然

气水合物温压稳定带、孔隙水甲烷及盐度分布等多套物理和化学场有效耦合配置,水合物高饱和度对

于砂岩岩性的依赖程度较小,而在烃类气体成因上差别不大。

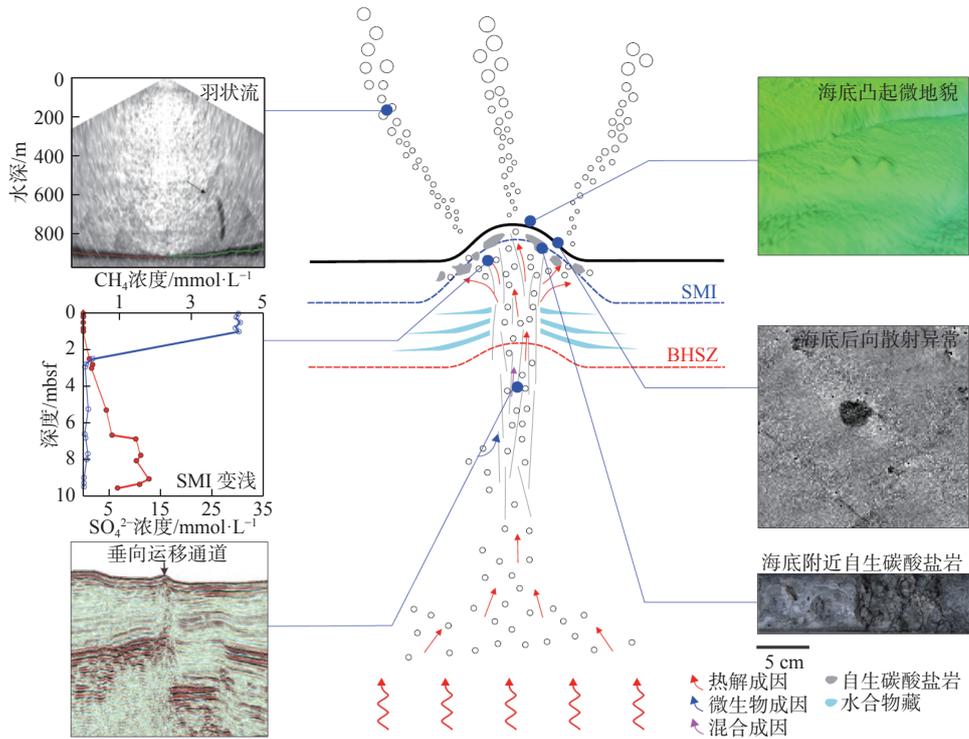


图6 浅表层泥火山型天然气水合物藏及其表征地质模式

Fig.6 Geological model of the near-seafloor gas hydrate accumulation associated with the mud volcano and its geological expressions

2.2 勘探思路及存在问题

泥火山型天然气水合物藏的首要工作是寻找温压场约束下的活跃泥火山系统,通过船载声学探测手段在大范围海域中获得海底地貌及水体数据,根据这些数据初步获得潜在泥火山,之后结合地震资料构建该系统在沉积物—海底—水体连续空间中的表征,通过孔隙水地球化学分析优选出运移通道附近甲烷排出与渗漏活跃的泥火山系统,然后通过浅钻技术确认通道附近水合物的富集程度,从而实现由寻找泥火山点源而发现周围环状水合物储层的勘探目标,即“抓点找环”。可以看出,泥火山型天然气水合物成藏勘探思路是以标定高通量甲烷运移的泥火山为核心,以3G异常(geomorphological-geophysical-geochemical anomalies)为指示,将泥火山-水合物系统形成的圣诞树结构作为勘探对象并建立成藏系统。

然而,到目前为止,泥火山型水合物藏勘探理

论与技术尚未成熟,依旧存在着下述方面的问题:

①单个泥火山地质系统的严格界定需要水体、海底及沉积物的声学信息以及钻探岩心(泥角砾)的支持,这种界定在勘探过程并非必要的,在适当条件下可将勘探目标调整为高通量甲烷点源地质系统(例如麻坑、冷泉等);②部分海域中获得的地质信息局限于浅地层空间中,深部地层信息尚不清楚,获得该部分信息会使成藏要素分析更加完整,成藏理论更加系统;③泥火山系统附近水合物有利储集层难以通过层序地层学等传统油气理论预测,其沉积和岩石特征更易受到深水沉积过程的影响;④精细矿体刻画需要加强,泥火山-水合物系统中水合物储集层厚度最高仅为数米,其范围、厚度、饱和度的确定需要更多钻井数据的支持,薄层矿体的宏观刻画也需要更加精细的地球物理技术;⑤系统中可见饱和度极高(接近100%)的厚层水合物样本,该块状水合物是如何替代沉积物充填在地层当中,即泥岩中甲烷流体的充注过程并未得到科学的解释,该

问题的解答有助于理解成藏系统中的运聚过程; ⑥泥火山附近水合物埋藏深度较浅, 岩石压实程度极低, 钻探过程容易破坏局部温压场并引起岩石的不稳定性, 如何在尽力减小上述后果的前提下开展勘探工作是需要攻克的难题。

3 结论

笔者通过回顾巴伦支海、日本海、哥斯达黎加海域、鄂霍次克海和中国海域泥火山系统地质表征及其附近天然气水合物富集特征, 完善了泥火山型天然气水合物藏地质模型, 该模型中高饱和度水合物主要出现在泥火山物质运移通道附近。归纳了以 3G 异常为指示、以海底高通量点源甲烷排放为核心的勘探思路, 泥火山型水合物藏勘探理论和技术还尚未成熟, 其完善需要泥火山活动规律、泥岩水合物充填过程等科学问题的解决以及浅钻水合物样品、随钻测井等地质调查资料的验证。

参考文献:

- [1] Kopf A J. Significance of mud volcanism[J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40: 1005.
- [2] Li A, Davies R J, Mathias S, et al. Gas venting that bypasses the feather edge of marine hydrate, offshore Mauritania[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 402-409.
- [3] Roberts H H. Fluid and gas expulsion on the northern Gulf of Mexico continental slope: Mud-prone to mineral-prone responses, natural gas hydrates: occurrence, distribution, and detection[J]. American Geophysical Union, 2001: 145-161.
- [4] Somoza L, Leon R, Ivanov M, et al. Seabed morphology and hydrocarbon seepage in the Gulf of Cadiz mud volcano area: Acoustic imagery, multibeam and ultra-high resolution seismic data[J]. *Marine Geology*, 2003, 195: 153-176.
- [5] Mazzini A, Etiope G. Mud volcanism: An updated review[J]. *Earth Science Reviews*, 2017, 168: 81-112.
- [6] Sauter E J, Muyakshin S I, Charlou J L, et al. Methane discharge from a deep-sea submarine mud volcano into the upper water column by gas hydrate-coated methane bubbles[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 243: 354-365.
- [7] 何家雄, 祝有海, 翁荣南, 等. 南海北部边缘盆地泥底辟及泥火山特征及其与油气运聚关系[J]. *地球科学*, 2010, 1: 79-90.
- [8] Houghton J T, Callander B A, Varney S K. The supplementary report to the IPCC scientific assessment[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992, 29.
- [9] Milkov A V, Sassen R, Apanasovich T V, et al. Global gas flux from mud volcanoes: A significant source of fossil methane in the atmosphere and the ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30: 1037.
- [10] Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas Hydrates[J]. *Marine Geology*, 2000, 167(1/2): 29-42.
- [11] Milkov A V. Global distribution of mud volcanoes and their significance in petroleum exploration as a source of methane in the atmosphere and hydrosphere and as a geohazard [M]// *Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity*. NTAO Science Series, 2005, 51: 29-34.
- [12] 蔡 峰, 闫桂京, 梁 杰, 等. 大陆边缘特殊地质体与水合物形成的关系[J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(6): 11-15.
- [13] 李 清, 王家生, 蔡 峰, 等. 天然气水合物系统多幕次甲烷渗漏作用的底栖有孔虫同位素响应——以IODP 311航次为例[J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(6): 29-36.
- [14] 闫桂京. 小道距高分辨率三维地震探测新技术助力海域天然气水合物勘查[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(1): 70.
- [15] 董 刚, 龚建明, 王家生. 从天然气水合物赋存状态和成藏类型探讨天然气水合物的开采方法[J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(6): 59-64.
- [16] 孙运宝, 赵铁虎, 蔡 峰. 国外海域天然气水合物资源量评价方法对我国的启示[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(1): 27-35.
- [17] Umberta T, Michela G. An overview of mud volcanoes associated to gas hydrate system[J]. *Intech*, 2012: 1-44.
- [18] Pape T, Feseker T, Kasten S, Fischer D, Bohrmann G. Distribution and abundance of gas hydrates in near - surface deposits of the Håkon Mosby Mud Volcano, SW Barents Sea[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, 12(9).
- [19] Feseker T, Boetius A, Wenzhöfer F, et al. Eruption of a deep-sea mud volcano triggers rapid sediment movement[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5385.
- [20] Matsumoto R, Hiromatsu M, Sato M. Fluid flow and evolution of gas hydrate mounds of Joetsu Basin, eastern margin of Japan Sea: constraints from high-resolution geophysical survey by AUV [C]//*Proceedings of the 7th International conference on gas hydrate*. Edinburgh, 2011: 17-21.
- [21] Matsumoto R, Kakuwa Y, Snyder G, et al. Occurrence and origin of thick deposits of massive gas hydrate, eastern margin of the Sea of Japan [C]//*Proceedings of the 9th International Conference on Gas Hydrates*. Denver, USA, 2017: 25-30.
- [22] Schmidt M, Hensen C, Mörz T, et al. Methane hydrate accumulation in “Mound 11” mud volcano, Costa Rica forearc[J]. *Marine Geology*, 2005, 216(1): 83-100.
- [23] Crutchley G J, Klaeschen D, Planert L, et al. The impact of fluid advection on gas hydrate stability: Investigations at sites of methane seepage offshore Costa Rica[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 401: 95-109.
- [24] Shakirov R, Obzhairov A, Suess E, et al. Mud volcanoes and gas vents in the Okhotsk sea area[J]. *Geo-Marine Letters*, 2004,

- 24(3): 140-149.
- [25] Luan X W, Jin Y K, Obzhirov A, et al. Characteristics of shallow gas hydrate in Okhotsk Sea [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(3): 415-421.
- [26] Li Q, Cai F, Liang J, et al. Geochemical constraints on the methane seep activity in western slope of the middle okinawa trough, the East China Sea [J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(6): 986-995.
- [27] Xu C L, Wu N Y, Sun Z L, et al. Methane seepage inferred from pore water geochemistry in shallow sediments in the western slope of the Mid-Okinawa Trough [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 98: 306-315.

A GEOLOGICAL MODEL FOR SHALLOW GAS HYDRATES ACCUMULATION ASSOCIATED WITH MUD VOLCANO

LI Ang^{1,2}, CAI Feng^{1,2*}, LI Qing^{1,2}, YAN Guijing^{1,2}, SUN Yunbao^{1,2}, DONG Gang^{1,2}, LUO Di^{1,2}

(1 Key Laboratory of Gas Hydrate of Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China; 2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: The mud volcanism in deep-water setting may provide transporting media and migration pathway for methane movement from the deep to the shallow, that may provide unique opportunities for gas hydrate to form and accumulate near the mud volcanoes. Some theoretical hypotheses concerning the resource potential and the climatic impact of such gas hydrates have been reported, but less discussion is available concerning its engineering aspects. This study made a review on the research progress and the accumulating mechanism of some typical marine mud volcano-gas hydrate systems around the world. Combined with the survey results in China's sea territory, we worked out in this paper a geological model for the gas hydrate accumulations associated with mud volcanoes. The geological records of the elements of the model are worked out, and the signatures of 3G anomalies, which indicate the gas hydrates associated with the mud volcano, are acquired. Upon the basis, some suggestions are summed up for practical exploration of this type of gas hydrates in the sea.

Key words: mud volcano; gas hydrate; 3G anomalies; accumulation geological model