

海底泥火山构造与天然气水合物成矿关系*

刘杰^{1,2)}, 苏明¹⁾, 杨睿¹⁾, 乔少华¹⁾, 丛晓荣¹⁾

1) 中国科学院天然气水合物重点实验室, 广州, 510640;

2) 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉, 430074

1 泥火山形态特征及内部结构

海底泥火山也称海底泥丘、泥拱, 呈圆丘状凸起于海底。泥火山外部形态多样, 常见的类型有: 顶部上凸的圆锥状型、顶部平坦型、下凹的塌陷型 (Yusifov, 2004)。圆锥状型泥火山翼部较陡, 可达 20° 以上, 且抗侵蚀能力较强; 顶部平坦型翼部较缓, 翼部坡度通常小于 5° 。单个泥火山由两部分组成: 外部建造和内部供给系统。外部建造包括顶部呈漏斗状的中央火山口、翼部的小型喷口。内部供给系统包括中央主供给通道和由中央供给通道向上分支成的数个供给通道组成。来自深部泥源层的泥质黏土状流体通过中央供给通道和翼部的小型供给通道向上运移, 呈周期性的喷发。纵向上多期叠加的泥火山, 常具有圣诞树的几何外形。平面上泥火山地区常在浅层发育环状断层或塌陷补偿构造, 形成环形凹地, 周围常填充来自泥火山喷发的泥流 (Vogt et al., 1999)。

2 泥火山对天然气水合物成藏条件的影响

海底泥火山与其周缘的天然气水合物矿体存在着紧密的关联。泥火山内含气流体的上侵, 会引起水合物稳定域温压场和地球化学特征的变化, 从而影响水合物的形成和稳定赋存。同时, 泥火山构造作为一种重要而有效的运移通道类型, 其携带的甲烷还可以成为形成的天然气水合物的重要气体来源。泥火山对天然气水合物成藏的控制具体表现在以下4个方面:

(1)对温压场的影响: 一方面泥火山对周缘温度场的扰动会影响水合物的形成和稳定, 另一方面水

合物形成-分解的热效应, 也会一定程度上造成泥火山周缘的热异常。这种相互影响可以通过泥火山周缘水合物的空间分布特征得到验证。如巴伦支海的 Håkon Mosby 泥火山直径约为 200 m 左右, 泥火山中心温度较高, 泥火山外部周围地层等温线围绕泥火山由内向外快速降低。钻探得到的水合物分布特征与温度场分布一致, 即呈环带状分布, 靠近泥底辟中心处不含水合物, 离泥底辟一定距离处饱和度达到最大, 之后向外减少, 直至不含水合物 (Ginsburg et al., 1999)。

(2)对气源特征的控制: 海底泥火山喷溢的气体主要由 CH_4 、 C_2H_6 、 C_3H_8 等低分子碳氢化合物、 N_2 、 CO_2 、硫化物组成 (Yurika, 2000)。研究表明 (Sloan et al., 2010): 不同气体组分对天然气水合物的相平衡曲线有一定影响, 并因此影响天然气水合物稳定带厚度, 其中丙烷对天然气水合物的稳定带厚度的影响最大, 硫化氢次之, 然后是乙烷, 二氧化碳影响最小。利用碳氢化合物气体成分 C_1 与 C_1+C_2 的比值 R 和甲烷的同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值来判别泥火山喷溢的天然气成因以热解气为主, 生物气次之, 如台西南盆地海底泥火山喷溢的天然气以成熟-高熟煤型气为主, 亦有成熟煤型气或油型气、生物气和亚生物气等产出。

(3)对运移通道的控制: 海底泥火山周缘常发现甲烷气泡羽状流、麻坑等指示含气流体逸散的现象, 这些现象说明泥火山可以为天然气水合物的形成提供高效的运移通道。比如在地中海海岭 Olimpi 泥火山区富含甲烷的羽状流高度可达海底以上 200m, 其中 Napoli 泥火山和 Milano 泥火山中心的甲烷含量极高, 前者更是达到 772nmol/kg (背景浓度

注: 本文为国家自然科学基金项目 (编号 41206047) 和中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室开放基金 (TPR-2014-14) 资助成果。

收稿日期: 2015-02-03; 改回日期: 2015-03-01; 责任编辑: 周健。

作者简介: 刘杰, 男, 1986 年生。硕士, 助理研究员, 目前主要从事海域天然气水合物成藏地质条件分析方面的科研工作。

Email: liujie1@ms.gicc.ac.cn。

0.8 nmol/kg) (Charlou et al., 2003)。在水合物稳定带中水合物生长速率取决于甲烷供给通量, 甲烷供给通量大, 水合物生成快。

(4)对地球化学特征的影响: 甲烷气体在高盐度孔隙水中要比纯水体系中形成天然气水合物要求更高的压力或更低的温度条件。泥火山周缘地层中孔隙水盐度常与近海底地层正常盐度存在明显差异, 一般小于海水, pH 常呈碱性 (Dia et al., 1999)。比如 Håkon Mosby 泥火山最活跃的火山口部位孔隙水盐度较低, 且随深度变化不大, 其中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 等其它离子相对海水较低, 而 Br^- 、 I^- 较高 (Milkov et al., 2004)。主要离子 (Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^+) 相对较低的浓度和 Br^- 、 I^- 较高的浓度可能与成岩作用中粘土矿物和有机质的脱水作用有关 (Lein et al., 1999)。泥火山的圆丘状边缘部位的孔隙水, 盐度介于海水和泥火山中心之间, 且随着深度的增加降低, 浅部浓度较高, 向下迅速降低。

参 考 文 献 / References

- Charlou J L, Donval J P, Zitter T, Roy N, Jean-Baptiste P, Foucher J P, Woodside J. 2003. Evidence of methane venting and geochemistry of brines on mud volcanoes. *Deep-Sea Research I*, 50(8): 941~958.
- Dia A N, Castrec-Rouelle M, Boulegue J, Comeau P. 1999. Trinidad mud volcanoes: where do the expelled fluids come from? *Geochimica Cosmochimica Acta*, 63(7~8): 1023~1038.
- Ginsburg G D, Milkov A V, Soloviev V A, Egorov A V, Cherkashev G A, Vogt P R, Crane K, Lorenson T D, Khutorskoy M D. 1999. Gas hydrate accumulation at the Håkon Mosby Mud Volcano. *Geo-Marine Letters*, 19(1-2): 57~67.
- Lein A, Vogt P R, Crane K, Egorov A, Ivanov M. 1999. Chemical and isotopic evidence for the nature of the fluid in CH_4 -containing sediments of the Håkon Mosby Mud Volcano. *Geo-Marine Letters*, 19(1~2): 76~83.
- Milkov A V, Vogt P R, Crane K, Lein A Y, Sassen R, Cherkashev G A. 2004. Geological, geochemical, and microbial processes at the hydrate-bearing Håkon Mosby mud volcano: a review. *Chemical Geology*, 205(3~4): 347~366.
- Sloan E D, Koh C A, Sum A K. 2010. Gas hydrate stability and sampling: the future as related to the phase diagram. *Energies*, 3(12): 1991~2000.
- Vogt P R, Gardner J, Crane K. 1999. The Norwegian-Barents-Svalbard (NBS) continental margin: introducing a natural laboratory of mass wasting, hydrates, and ascent of sediment, pore water, and methane. *Geo-Marine Letters*, 19(1-2): 2~21.
- Yurika Ujiié. 2000. Mud diapirs observed in two piston cores from the landward slope of the northern Ryukyu Trench, northwestern Pacific Ocean. *Marine Geology*, 163(1-4): 149~167.
- Yusifov Mehdi, Rabinowitz P D. 2004. Classification of mud volcanoes in the South Caspian Basin, offshore Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*, 21 (8): 965~975.