

文章编号:1009-2722(2015)08-0053-09

海底泥火山特征及其与天然气水合物的成矿关系

刘杰^{1,2}, 孙美静³, 苏明^{1,2}, 杨睿^{1,2}

(1 中国科学院天然气水合物重点实验室, 广州 510640; 2 中国科学院广州天然气水合物研究中心, 广州 510640; 3 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 510075)

摘要: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, 近年来成为深水天然气水合物勘探的重要对象之一。从泥火山形态及内部结构、喷发物岩石学特征、泥火山周缘热异常特征等 3 个方面分析认为, 泥火山外部形态多样, 依据泥火山顶部的形状可将其分为 3 种: 圆锥型、平坦型和塌陷型; 海底泥火山喷发物岩石学特征与半深海—深海沉积具有显著差异, 喷出物组成混杂, 且来源多样; 泥火山作为一种流体逸散构造, 其分布常常与构造断裂、底辟(泥底辟、盐底辟)的分布一致, 且往往引起周缘地层热异常, 从而影响水合物的形成和赋存。将与泥底辟相关的泥火山形成过程划分为龟背阶段、刺穿阶段、生长(喷发)阶段和塌陷阶段 4 个阶段。在前述基础上分析了泥火山与天然气水合物的成矿关系, 指出泥火山对天然气水合物非均质性分布特征的控制作用、泥火山的形成与天然气水合物动态成藏、泥火山控制下的天然气水合物与常规油气资源共生机制将会是今后天然气水合物研究的重点方向。

关键词:泥火山; 岩石学特征; 形成机制; 天然气水合物; 成矿关系

中图分类号: P618.13 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2015.08008

海底泥火山是一种重要的、广泛分布的流体逸散系统, 其高度可达数百米, 宽度达数千米, 数量估计在 1 000~100 000 之间^[1]。泥火山往往发育在构造活跃、快速沉积的区域, 如汇聚型大陆边缘、前陆盆地和走滑构造带等^[2]。在活动大陆边缘, 如地中海海域^[3]、巴巴多斯海域^[4], 多数泥火山分布在以复杂的推覆构造为特征的增生楔上, 并沿主断层和背斜轴部走向呈串珠状、成排有规

律的分布; 但近年来在被动大陆边缘发现的泥底辟和泥火山也越来越多, 如挪威^[5]、尼日利亚^[6]、墨西哥湾^[7]等海域都发现了泥底辟或泥火山。这些泥底辟或泥火山发育地区基本都具有快速沉积、断裂活动和底辟构造等作用相结合的特点, 且往往发育在深水扇系统上; 此外, 热液活跃的地区也有利于泥火山的发育, 如美国的黄石公园^[8]、西西里岛的 Etna 地区^[9]。

随着探测手段和技术的飞速发展, 国际上针对海底泥火山开展了原位观测、地球物理探测、地球化学分析、物理和数值模拟等方面的研究^[6,10-17]。具体的研究内容既包括以泥火山作为研究对象的类型划分^[10]、外部形态描述与内部结构刻画^[6,10,11]、古活动期次划分与演化重建^[12,13]、机制分析^[13]等, 也包括泥火山及其周缘地层的温

收稿日期: 2015-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(41202080); 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); 中国科学院可再生能源重点实验室基金(y507j61001)

作者简介: 刘杰(1986—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事海域天然气水合物成藏条件分析方面的研究工作。E-mail: liujie1@ms.giec.ac.cn

度分布特征^[14]、沉积岩石学特征^[15]、微生物及地球化学特征^[16]、甚至地质灾害和气候变化^[17]等方面。

与国外相比,国内对泥火山的研究则处于起步阶段,目前多侧重于报道性文章或集中在泥火山的识别与描述^[18]、地球化学特征^[19]、形成机制^[20]等方面。本文通过综述泥火山的形态及内部结构、喷发物岩石学特征、泥火山周缘热异常特征,并对泥火山形成过程及其与天然气水合物的成矿关系进行了分析,以期对我国海域天然气水合物的勘探有所帮助。

1 海底泥火山特征

1.1 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,常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(图 1a、1b)、顶部平坦型

(泥饼)(图 1c)、顶部下凹的塌陷型(图 1d)^[2,21]。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 <5°。实验表明宽的供给通道利于产生顶部平坦的泥火山,窄的供给通道有利于产生圆锥状泥火山^[22]。

单个泥火山构造由外部建造和内部供给系统两部分组成。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;内部供给系统包括主供给通道和由主供给通道向上分支成的数个供给通道组成。供给通道可以是圆柱形,不规则形,也可以是狭缝,比如断层、裂缝等。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^[23](图 1a)。

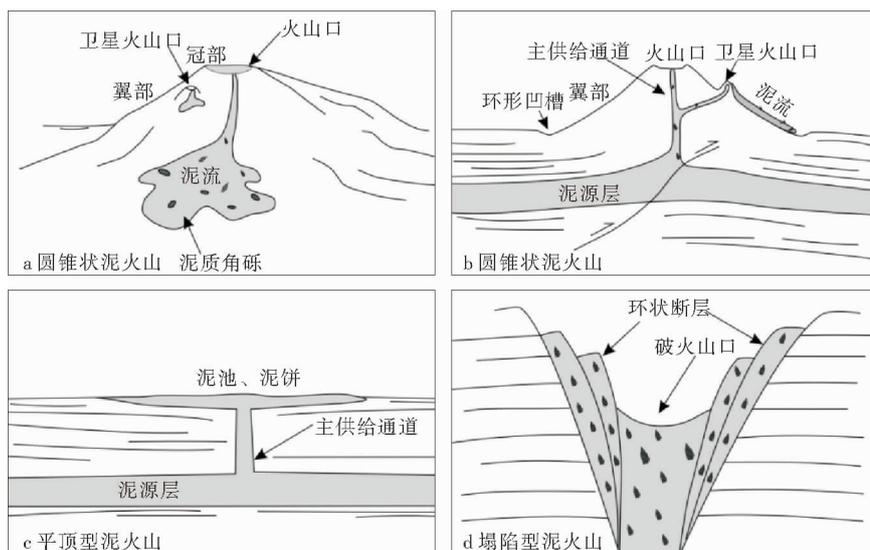


图 1 常见的泥火山结构(据文献[2]修改)

Fig. 1 Schematic diagrams of cone-shaped (a, b), pie-shaped (c) and collapsed (d) mud volcanoes (modified from reference [2])

1.2 泥火山喷发物沉积岩石学特征

海底泥火山喷出物一般来自深部 2~15 km 处^[1],由碎屑岩、角砾岩、方解石、碳酸盐、硫等固体和流体(水、盐类、石油、甲烷、二氧化碳等)组成。喷溢的气体主要由 CH₄、CO₂、N₂、C₂H₄、

C₃H₈ 及其他低分子碳氢化合物、硫化物组成^[15]。泥火山喷发物岩石学特征与海底半深海—深海沉积具有显著差异。不同泥火山喷出物的黏度、密度、组成等变化较大,喷出物可以从低黏度、低密度、以水为主到高黏度、高密度、膏状的泥之间变化^[24]。

泥火山喷发物以黏土(高岭石、蒙脱石等)为主,含石英颗粒、角砾岩或岩石碎块。岩心粒度分析表明,不同地质背景下,不同泥火山的喷发物粒度分布不同;墨西哥湾地区泥火山喷发物中泥质含量达 50~80%^[7];台湾地区泥火山岩心分析表明其泥质含量为 30~60%^[18]。泥火山喷发物中有时见石膏结晶和黄铁矿,一般呈基质支撑;石英颗粒、泥岩角砾分选磨圆较差,显示机械破坏的特征。泥火山喷出物常见气孔状构造和裂缝^[25]。喷发的泥流再搬运后具有正递变层理,每期泥流层底部常具有侵蚀特点。泥火山溢出的甲烷气体可以为海底附近靠化合作用维持营养结构的微生物提供食物,因此,周围常分布菌毡、管状虫或海绵等特殊生物组合。同时,大型双壳类、小型腹足类等生物化石常见,且生物扰动构造发育,以垂直或倾斜的洞穴较为常见,偶见洞穴被微晶填充。有时泥火山上发育成岩碳酸盐结壳,这些碳酸盐结壳常被泥火山活动破坏打碎^[26]。

喷出物中岩石碎块的固结程度变化较大,从固结较强的钙质到半固结;喷发物所含岩石成分和微体化石时代不相同^[6]表明泥火山的喷出物具有多源的特点。超微化石和浮游有孔虫分析可用于确定泥火山形成的时代、深部地层的沉积环境等。

1.3 泥火山周缘热异常及影响因素

墨西哥湾^[7]、贝加尔湖^[27]、黑海^[28]、挪威海^[29]、哥斯达黎加^[30]等泥火山发育地区地热研究表明,泥火山作为一种流体逸散构造,常引起周缘地层热异常。这些泥火山发育区通常伴随增强的热流体活动,热流值达 150~200 mW/m²,温度达到 20 °C。泥火山外部温度在泥火山中心及附近达到最大值,之后呈同心环状,随着深度非线性地快速下降,离泥火山中心 0.5~1.5 km,热异常消失。Deville 等^[31]对特立尼达拉岛泥火山的周期活动进行分析后认为,泥火山内部温度随深度的分布特征与多种因素有关,如上升流体的物理性质、气体通量、泥流量等。泥火山内部温度分布由下至上可分为 3 个带:底部扰动带、中部均一带、顶部对流带。

泥火山周缘地层热异常主要是海底泥火山强烈的热流体对流引起的,其次是热传导。热对流

主要是指含气流体、自由气、液化泥流等流体,通过断层、裂缝等通道向上运移过程中的热量传递。泥火山及下伏地层的岩石热物理性质(如热导率、比热、热容等)会影响泥火山周缘的热传导,从而影响泥火山周缘温度分布特征。一定的温度、压力条件下,岩石的热导率取决于岩石的矿物成分、结构、所含流体的饱和度及流体的热导率。随着各种条件的变化,岩石的热导率具有明显的差别。常见造岩矿物中,石英的热传导系数最高,云母等热传导系数相对较低。泥岩中含有大量热导系数较低的黏土矿物,故热导率低于砂岩。与周围半深海—深海沉积相比,泥火山沉积物通常岩石成分复杂,石英成分相对较高,具有较高的热导率,可达 1.1~1.2 W/m/K,而周围沉积物在 0.7~1.0 W/m/K 左右^[7,27-30]。

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。Ginsburg 等^[14]研究了位于挪威海 1 250~1 260 m 水深处的 Håkon Mosby 泥火山与水合物的成矿关系。该泥火山直径约为 200 m,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(图 2)。

同时海底地形的变化对局部的热流体对流和传导有显著影响,出现低地汇聚和高地遣散现象,引起温度场变化^[30,32]。Grevemeyer 等^[30]对 Costa Rica 地区的 Mound Culebra 泥拱附近的热流值和地温梯度分布进行分析,认为地形的变化会引起热量值在泥拱两侧的低地汇聚增大,在泥拱顶部高地遣散而变小。研究表明在没有进行地形矫正的情况下,Mound Culebra 泥拱热流量整体比周围海底热流高,泥拱具有由两翼部沿泥拱斜坡向上增大的趋势,并在斜坡处达到最大,在泥拱顶部热流值下降到接近海底背景值的特点。经过地形矫正后,地热分布与地形分布一致,从 Mound Culebra 泥拱西北部的 34 mW/m² 到顶部增大到 58 mW/m²。

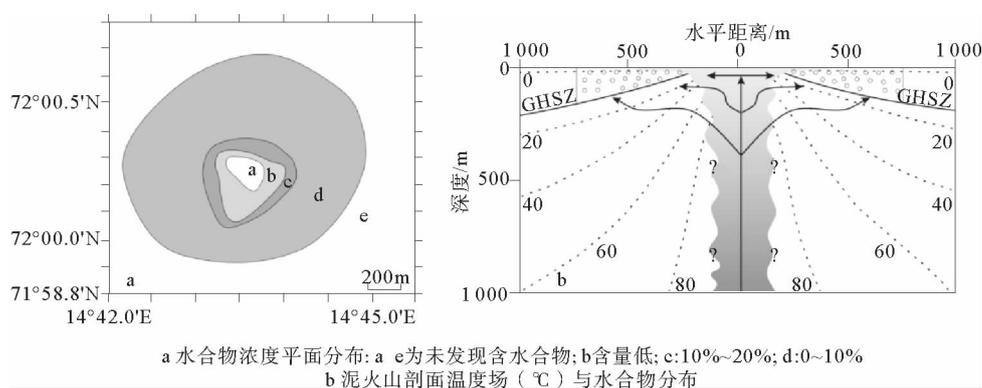


图2 Håkon Mosby 泥火山的温度剖面与水合物分布关系(据文献[14])

Fig. 2 Proposed distribution of gas hydrate and temperature in the HMMV (from reference [14])

2 泥火山的形成机制

泥火山在空间上的分布常常与构造断裂、底辟(泥底辟、盐底辟)的分布一致,其形成常由断层活动的触发引起。如阿塞拜疆的泥火山呈链状在两个互相垂直的方向上(SE—NW 和 SW—NE 向)延伸,最大的泥火山建造位于这2个主方向相交的地方^[10]。泥火山的形成有2种基本机制:①泥火山直接形成于刺穿海底泥底辟的顶部,泥火山之下可见泥底辟构造形成的褶皱如地中海的 Gelendzhik、Maidstone、Moscow 等泥火山^[33],这种与刺穿海底泥底辟有关的泥火山的形成常常与流体的迁移作用、沉积物粒度、底辟物质的固结程度相关,通常规模比较大;②泥火山的形成是液化的泥流沿断层和破碎带上升的结果,在这种情况下,具有高流体含量的沉积物到达海底并形成泥火山建造。机制②中泥火山可以与密度倒转形成的泥底辟有联系,泥底辟常位于海底之下的某一深度处,如墨西哥湾和黑海,也可以是泥火山通道直接通到源岩地层中,这种情况下形成的泥火山火山口往往较平坦,如挪威海的 Håkon Mosby 泥火山^[11]和黑海的 Dvurechenskii 泥火山^[34]。鉴于泥火山的形成与泥底辟的关系密切,下面详细分析与泥底辟相关的泥火山形成过程。该过程可划分为以下4个阶段:

(1) 早期阶段: 龟背阶段

龟背上拱是底辟活动初期的产物。当厚层泥岩达到一定埋深时,受盆地深部异常温度、压力的

影响,泥岩呈塑性流动。在密度反转产生的浮力、超压、构造挤压作用或不均衡压实作用下,泥岩变形并上拱侵入上覆地层。随着流体压力的积累,当超过岩石的抗张强度,便形成一系列密集的流体压裂,形成低幅背斜形态,称为龟背型底辟体(图3a)。

(2) 中期阶段: 刺穿阶段

龟背的形成及层内流体压裂的存在将加快超压带内的热流体活动,同时使龟背核部的流体压力进一步增大,一旦流体压力超过龟背背斜上方盖层所能承受的压力,盖层将发生破裂,此时形成了穿刺型放射状正断层和裂隙系统。同时受底辟构造近垂向抬升的作用,这一阶段可以形成倾向向外的近同心环状断裂(图3b)。

(3) 晚期阶段: 生长(喷发)阶段

泥底辟强烈刺穿围岩或地层,在接近海底时,由于压力下降,气体溶解度降低,泥底辟内封存的大量气体会从流体中析出,体积发生膨胀。这使得泥底辟顶部孔隙度增加,密度下降,进一步加大了泥底辟上升的浮力^[25],同时,泥底辟顶部横向扩张呈囊状、花冠状。最后,当泥底辟内部压力积累到一定程度,或有外部的触发机制如地震作用,孔隙流体和大量气体通过泥底辟周缘的输导通道大量逸散、喷发,在海底形成圆锥状或平坦型的泥火山建造或麻坑,水体中形成羽状气泡流。泥火山的不同外部形态特征与泥流黏度、供给通道宽度等有关^[22,34]。当喷发物的泥质角砾岩含量较高,黏度较大,并呈同心放射状喷发会形成圆锥状泥火山。来自泥火山的喷发物沿着斜坡向下

搬运,常形成平面上呈扇形的泥质碎屑流^[35]。泥火山的多期次喷发物形成的泥质碎屑流,与半远洋沉积形成指状互层^[36,37](图 3c)。

(4) 末期阶段:塌陷阶段

泥火山多期喷发,释放出大量能量后,顶部发生塌陷形成倾向向内的环状断层和下凹的喷口,成为破火山口(calderas)。破火山口的形成标志

着一个完整的泥火山形成过程结束。接着破火山口继续接受沉积作用,越接近破火山口核部,其塌陷幅度一般越大,沉积越厚。随着时间的推移,该泥火山深部积聚的能量越来越多,当达到或超过上覆地层的压力时,泥火山便被激活,开始二次活动。如此往复,便形成纵向上多旋回叠加的泥火山(图 3d)。

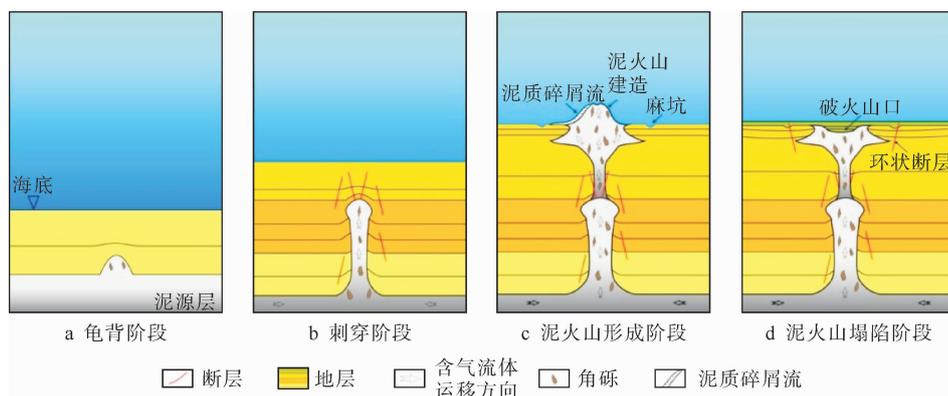


图 3 泥火山形成过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the formation of mud volcanoes

3 泥火山与天然气水合物的关系

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。天然气水合物形成的静态要素包括水合物稳定域的温压条件和地球化学特征、气体来源、运移条件、沉积作用等诸多因素。海底泥火山对一定区域内的温压条件和地球化学特征、气体运移通道会产生不同程度的影响,进而影响天然气水合物的成藏。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富集。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天然气水合物的重要气体来源。

天然气水合物既可以在泥火山构造的丘状外围成藏,也可以在其外围的海底沉积物中产出。泥火山的分布与似海底反射的平面分布范围具有良好的空间匹配关系。在地震剖面上可以通过 BSR,分析泥火山周缘是否存在水合物藏。一般而言,有 BSR 伴生的泥火山地区往往有水合物产

出,如鄂霍次克海西北部发育大量泥火山、泥底辟构造其上见 BSR 反射。剖面上,泥火山内部呈杂乱反射或模糊反射,纵向上可见同相轴下拉现象,与高角度断裂体系和垂向裂缝体系一同构成了流体运移通道,顶部及翼部常伴随有亮点振幅异常,指示含气流体的运移^[32]。但有水合物产出的泥火山发育区未必就有 BSR。如黑海的 Sorokin 海槽处的泥火山如 Dvurechenskii、Yaltu、Odessu 等取样中样品普遍发现水合物,但地震剖面上都没有 BSR 显示^[28]。这可能是由于水合物稳定带含水合物层较薄、水合物含量及下伏气体含量较低等缘故。由此可见,水合物与 BSR 之间并没有严格的对应关系,无明显 BSR 的泥火山地区,是勘探“隐蔽天然气水合物矿藏”的重要方向。

值得注意的是泥火山的形成与水合物层的形成两者是相互影响的,不仅泥火山可以影响水合物的形成,水合物层的形成也可能影响泥火山的形成。巴拿马北部海底泥火山发育区主要位于冲断带下斜坡的最大沉积中心内。泥火山位于下伏泥底辟背斜转折端的上部,BSR 位于上覆泥火山和下伏泥底辟之间。这种特殊的空间配置关系暗

示泥火山的形成可能与水合物有关。Reed 等^[38]推测天然气水合物在该区泥火山的形成中起着重要作用:甲烷气体沿着泥底辟周缘断裂向上运移到泥底辟背斜转折端,在合适的温压条件下形成

水合物。而水合物层起到封闭的作用,当含水合物层下部游离气聚集到一定程度,产生高压突破含水合物层。含气流体、未固结的泥岩便喷发出来形成泥火山(图4)。

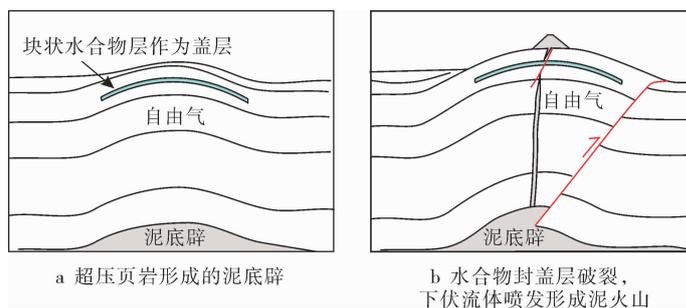


图4 块状天然气水合物作为封盖层影响泥火山的形成示意图(据文献[37])

Fig. 4 Model for MV evolution with massive gas hydrate acting as the seal (from reference [37])

4 海底泥火山与天然气水合物成矿研究存在的问题

4.1 泥火山控制下水合物非均质性分布特征

保守估计,全球含天然气水合物的泥火山数量可能占泥火山总量10%左右^[1]。在里海,来自Buzdag泥火山的20个重力岩心中有19个观察到水合物,且产状以瘤状主,体积含量变化较大,在2%~35%之间;Elm泥火山的7个重力岩心中有5个发现了水合物,体积含量最大达17%^[39];在巴巴多斯海域,在5个取样的泥火山中仅Atalante泥火山证实含有水合物^[22];在地中海Olimpi区,采得23个泥火山和底辟体的海底表层样品,未发现水合物;在地中海Anaximander区,采得6个泥火山的样品,仅在Kula泥火山发现含有水合物^[3]。因此,泥火山控制下的水合物非均质分布特征有待进一步研究。

4.2 泥火山的形成与水合物动态成藏

泥火山一般呈有规律的周期性喷发,这种周期活动不仅受构造的幕式活动控制或调节,而且受深层压力和能量的聚集及其间歇释放控制^[31,40,41]。泥火山的这种多期活动的特点,导致纵向上泥火山常多期叠加。同时,水合物矿藏形

成后处于生成—分解—再生成的动态平衡状态,将泥火山形成的各阶段及泥火山多期活动与天然气水合物动态成藏过程联系起来也有待进一步深入研究。

4.3 泥火山控制下的水合物、常规油气资源共生机制

由于泥底辟构造具有强大的超压驱动流体、充足的气体供应和良好的输导体系等独特特征,理论上泥底辟构造带纵向上可以形成深部高温超压气藏^[42]、中—浅层常规气藏、超浅层气藏、水合物矿藏的复杂含油气系统。天然气水合物与超浅层天然气藏的形成有直接关系,可以形成3种共生模式,即泄漏共生模式、封盖共生模式和遮盖侧储模式^[43,44]。因此,研究泥底辟与常规天然气藏、天然气水合物矿藏的共生模式具有重要意义。

5 结论

(1)泥火山外部形态多样,常见的类型有圆锥状型、平坦型、塌陷型3种,与喷发物黏度、供给通道的形状等有关。泥火山喷发物的组成混杂,具有多源的特点。可以根据喷出物的成分、所含微体化石的类型确定泥火山形成的时代、深部地层的沉积环境等。

(2)泥火山在空间上的分布常常与构造断裂、

底辟(泥底辟、盐底辟)的分布密切相关,与泥底辟相关的泥火山形成过程可划分为 4 个阶段:龟背阶段、刺穿阶段、生长(喷发)阶段、塌陷阶段。

(3)泥火山作为一种流体逸散构造,常引起周缘地层热异常,从而影响水合物的形成和赋存。泥火山控制下水合物非均质性分布特征、泥火山的形成与水合物动态成藏、泥火山控制下的水合物与常规油气资源共生机制将会是今后天然气水合物研究的重点方向。

综上所述,研究泥火山特征及其与天然气水合物的成矿关系,对天然气水合物赋存规律、水合物远景区的选择甚至探明全球天然气水合物资源和分布具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates[J]. *Marine Geology*, 2000, 167(1/2): 29-42.
- [2] Kopf A J. Significance of mud volcanism[J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40(2): 1-52.
- [3] Lykousis V, Alexandri S, Woodside J. Mud volcanoes and gas hydrates in the Anaximander mountains (Eastern Mediterranean Sea)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(6): 854-872.
- [4] Sumner R H, Westbrook G K. Mud diapirism in front of the Barbados accretionary wedge: the influence of fracture zones and North America-South America plate motions[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(5): 591-613.
- [5] Kaul N, Foucher J P, Heesemanna M. Estimating mud expulsion rates from temperature measurements on Håkon Mosby Mud Volcano, SW Barents Sea[J]. *Marine Geology*, 2006, 229(1/2): 1-14.
- [6] Graue K. Mud volcanoes in deepwater Nigeria[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(8): 959-974.
- [7] Kohl B, Roberts H H. Fossil Foraminifera from four active mud volcanoes in the Gulf of Mexico[J]. *Geo-Marine Letters*, 1994, 14(2-3): 126-134.
- [8] Pitt A M, Hutchinson R A. Hydrothermal changes related to earthquake activity at Mud Volcano, Yellowstone National Park, Wyoming[J]. *Journal Geophysical Research*, 1982, 87(B4): 2 762-2 766.
- [9] Etiope G, Caracausi A, Favara R, et al. Methane emission from the mud volcanoes of Sicily (Italy) [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 29(8): 561-564.
- [10] Kholodov V N. Mud Volcanoes, Their Distribution Regularities and Genesis; Communication 1. Mud Volcanic Provinces and Morphology of Mud Volcanoes[J]. *Lithology and Mineral Resources*, 2002, 37(3): 197-209.
- [11] Milkov A V, Vogt P R, Crane K. Geological, geochemical, and microbial processes at the hydrate-bearing Håkon Mosby mud volcano: a review[J]. *Chemical Geology*, 2004, 205(3-4): 347-366.
- [12] Murton B J, Biggs J. Numerical modelling of mud volcanoes and their flows using constraints from the Gulf of Cadiz[J]. *Marine Geology*, 2003, 195(1-4): 223-236.
- [13] Luis Somoza, Teresa Medialdea, Ricardo León, et al. Structure of mud volcano systems and pockmarks in the region of the Ceuta Contourite Depositional System (Western Alborán Sea)[J]. *Marine Geology*, 2012, 332-324: 4-26.
- [14] Ginsburg G D, Milkov A V, Soloviev V A, et al. Gas hydrate accumulation at the Håkon Mosby Mud Volcano [J]. *Geo-Marine Letters*, 1999, 19(1-2): 57-67.
- [15] Yurika Ujiie. Mud diapirs observed in two piston cores from the landward slope of the northern Ryukyu Trench, northwestern Pacific Ocean[J]. *Marine Geology*, 2000, 163(1-4): 149-167.
- [16] Lichtschlag A, Felden J, Bruchert V, et al. Geochemical processes and chemosynthetic primary production in different thiotrophic mats of the Håkon Mosby Mud Volcano (Barents Sea)[J]. *Limnology. Oceanography*, 2010, 55(2): 931-949.
- [17] Judd A G, Hovland M, Dimitrov L I, et al. The geological methane budget at Continental Margins and its influence on climate change[J]. *Geofluids*, 2002, 2(2): 109-126.
- [18] Chen S C, Hsu S K, Wang Y S. Distribution and characters of the mud diapirs and mud volcanoes off southwest Taiwan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 92(1): 201-214.
- [19] Sun C H, Chang S C, Kuo C L, et al. Origins of Taiwan's mud volcanoes: Evidence from geochemistry[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37(2): 105-116.
- [20] Lei C, Ren J Y, Clift P D, et al. The structure and formation of mud diapir in the Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(5): 980-991.
- [21] Yusifov M, Rabinowitz P D. Classification of mud volcanoes in the South Caspian Basin, offshore Azerbaijan[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21(8): 965-975.
- [22] Lance S, Henry P, Le Pichon X, et al. Submersible study of mud volcanoes seaward of the Barbados accretionary wedge: Sedimentology, structure and rheology[J]. *Marine Geology*, 1998, 145(3-4): 255-292.
- [23] Vogt P R, Gardner J, Crane K. The Norwegian-Barents-Svalbard (NBS) continental margin; introducing a natural laboratory of mass wasting, hydrates, and ascent of sedi-

- ment, pore water, and methane[J]. *Geo-Marine Letters*, 1999, 19(1-2): 2-21.
- [24] Gardner J M. Mud volcanoes revealed and sampled on the Western Moroccan continental margin [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(2): 339-342.
- [25] Brown K M. Nature and hydrogeologic significance of mud diapirs and diatremes for accretionary systems. *Journal of Geophysical Research*[J]. 1990, 95(B6): 8 969-8 982.
- [26] Eric Devillea, Sophie-Hélène Guerlaisa, Yannick Callec, et al. Liquefied vs stratified sediment mobilization processes: Insight from the South of the Barbados accretionary prism[J]. *Tectonophysics*, 2006, 428(1-4): 33-47.
- [27] Poort J, Klerkx J. Absence of a regional surface thermal high in the baikal rift; new insights from detailed contouring of heat flow anomalies[J]. *Tectonophysics*, 2004, 383(3-4):217-241.
- [28] Bohrmann G, Ivanov M, Foucher J P, et al. Mud volcanoes and gas hydrates in the Black Sea: new data from Dvurechenskii and Odessa mud volcanoes[J]. *Geo-Marine Letters*, 2003, 23(3-4): 239-249.
- [29] Eldholm O, Sundvor E, Vogt P R, SW Barents Sea continental margin heat flow and Håkon Mosby Mud Volcano [J]. *Geo-Marine Letters*, 1999, 19(1-2): 29-37.
- [30] Grevemeyer I, Kopf A J, Fekete N, et al. Fluid flow through active mud dome Mound Culebra offshore Nicoya Peninsula, Costa Rica: evidence from heat flow surveying [J]. *Marine Geology*, 2004, 207(1-4): 145-157.
- [31] Deville E, Guerlais S H. Cyclic activity of mud volcanoes: Evidences from Trinidad (SE Caribbean)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(9): 1 681-1 691.
- [32] 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(4): 269-286.
- [33] Ivanov M K, Limonov A F, van Weering T C E. Comparative characteristics of the Black Sea and Mediterranean Ridge mud volcanoes[J]. *Marine Geology*, 1996, 132(1-4): 253-271.
- [34] Limonov A F, van Weering T C E, Kenyon N H, et al. Seabed morphology and gas venting in the Black Sea mud volcano area: Observations with the MAK-1 deep-tow side-scan sonar and bottom profiler[J]. *Marine Geology*, 1997, 137(1-2): 121-136.
- [35] Prior D B, Doyle E H, Kaluza M J. Evidence for sediment eruption on deep sea floor, Gulf of Mexico[J]. *Science*, 1989, 243(4890), 517-519.
- [36] Kopf A, Robertson A H F, Clennell M B, et al. Mechanism of mud extrusion on the Mediterranean Ridge[J]. *Geo-Marine Letters*, 1998, 18(2): 97-114.
- [37] Van Rensbergen P, Morley C K, Ang D W, et al. Structural evolution of shale diapirs from reactive rise to mud volcanism: 3D seismic data from the Baram delta, offshore Brunei Darussalam[J]. *Journal of the Geological Society*, 1999, 156(3), 633-650.
- [38] Reed D L, Silver E A, Tagudin J E. Relations between mud volcanoes, thrust deformation, slope sedimentation, and gas hydrate, offshore north Panama[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1990, 7(1): 44-54.
- [39] Ginsburg G D, Soloviev V A. Mud volcano gas hydrates in the Caspian Sea[J]. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 1994, 41(1): 95-100.
- [40] Marco Bonini. Mud volcanoes: Indicators of stress orientation and tectonic controls[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 115(3):121-152.
- [41] Prrez-Belzuz F, Alonso B, Ercilla G. History of mud diapirism and trigger mechanisms in the Western Alboran Sea [J]. *Tectonophysics*, 1997, 282(1-4): 399-422.
- [42] 谢玉洪, 张迎朝, 李绪深, 等. 莺歌海盆地高温超压气藏控藏要素与成藏模式[J]. *石油学报*, 2012, 33(4): 601-610.
- [43] 雷新华, 林功成, 苗永胜, 等. 天然气水合物与传统油气资源共生藏模式初探[J]. *海相油气地质*, 2013, 18(1): 47-53.
- [44] Grauls D. Gas hydrates: Importance and applications in petroleum exploration[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(4): 519-523.

SUBMARINE MUD VOLCANO AND ITS RELATIONSHIP WITH GAS HYDRATE

LIU Jie^{1,2}, SUN Meijing³, SU Ming^{1,2}, YANG Rui^{1,2}

(1 Key Laboratory of Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2 Guangzhou Center for Gas Hydrate Research, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

3 Key laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510750, China)

Abstract: The coexistence of submarine mud volcanoes and their periphery gas hydrates illustrates the close relationship between them. Submarine mud volcanoes have been regarded as important exploration targets for deep-water natural gas hydrate in recent years. This paper deals with deep-water mud volcanoes from three aspects including morphology and internal structure, petrology characteristics of eruptions and ambient thermal anomaly. The mud volcanoes may vary in shape, and three kinds can be classified according to the shape of mud volcano crest: cone type, pie type and collapse type. Petrology of mud volcanic eruptions, of which composition is complex due to diverse sources, is significantly different to the abyssal sedimentary environment. The distribution of mud volcanoes, as a fluid dissipation structure, is commonly associated with faults, diapirs (mud diapirs or salt diapirs). The mud volcanoes often cause geothermal anomaly, which would affect the formation and occurrence of gas hydrate. The formation process of mud volcano related to a mud diaper could be divided into four stages: turtle back, pierce, eruption and collapse. Based upon the discussion above, the relationship between mud volcano and natural gas hydrate is analyzed. The results of the study suggest that the controlling effect of mud volcano over gas hydrate heterogeneity distribution, gas hydrate dynamic accumulation and its relationship with mud volcanoes, the coexistence of gas hydrate and conventional hydrocarbon controlled by mud volcanoes will become the main directions in future natural gas hydrate research.

Key words: mud volcano; petrology characteristics; forming mechanism; gas hydrates; forming relationship