

DOI: 10. 16562/j. cnki. 0256-1492. 2017. 06. 022

# 海底泥火山及其与油气和天然气水合物的关系

李进<sup>1,2</sup>, 王淑红<sup>1</sup>, 颜文<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301;

2. 中国科学院大学, 北京 101408)

**摘要:**近 20 年来泥火山逐渐成为全球地球科学家的研究热点, 尤其是随着海洋探测技术的进步, 海底泥火山得到广泛认识。全球泥火山大多分布在地中海-里海-喜马拉雅山活动带和太平洋活动带上, 其分布受构造作用控制。泥火山相比于岩浆火山来说分布较为局限, 但泥火山的研究价值同样重要, 其喷出物质可以非常准确地反映深部信息; 泥火山与深部油气的形成、运移、储藏在构造、热动力机制以及发育层位等方面都具有密切联系; 泥火山喷出气体中甲烷含量非常高, 一方面影响海洋水体、大气环境, 另一方面会在海底沉积物中聚集形成天然气水合物。我国南海海底泥火山较为发育, 对其开展深入研究不仅在探讨地球深部物质运移和演化方面具有重要的科学意义, 而且对南海海底油气和天然气水合物的勘探开发具有重要的实际应用价值。

**关键词:**泥火山; 油气; 天然气水合物; 南海

**中图分类号:** P738

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0256-1492(2017)06-0204-11

新能源的勘探开发已逐渐成为全球研究的热点, 海底天然气水合物作为一种新能源引起了全世界的广泛关注。随着海底天然气水合物研究的不断深入, 海底泥火山这一重要地质单元因其独特的地质特征及其对油气和天然气水合物的指示作用而引起了各国科学家的极大兴趣。海底泥火山是指存在于海底地形较高, 有大量气体、泥浆、流体(水、盐水、油气)流出或喷发的地方, 其外围形成丘状、锥状或者饼状的泥流堆积<sup>[1]</sup>, 具有低密度、低速度的地球物理特征<sup>[2,3]</sup>, 是海底深部物质由于底辟作用挤入浅部沉积层的构造单元<sup>[4]</sup>。海底泥火山通常都是由泥底辟演化而来的, 常发育在海底地层薄弱带, 泥火山和泥底辟两者的成因机理相同, 控制影响因素相似, 在构造以及形成机制上具有密切联系<sup>[2,5]</sup>。

根据国内外科学家在不同研究方向上获得的大量有关泥火山的地球物理、地球化学以及构造地质等方面的资料<sup>[6-10]</sup>, 普遍认为泥火山通常发育在沉积速率较快且具有横向挤压构造作用的沉积层中, 具有油气勘探的潜力, 但对于泥火山全面完整的认识仍然不足, 并未给出泥火山形成体系的物质来源和运移机制以及不同泥火山喷发不同泥浆的解

释<sup>[11,12]</sup>。

本文在综合分析泥火山的国内外研究现状基础上, 整理了泥火山在全球、尤其是在中国的分布情况, 并进一步讨论了海底泥火山与油气和天然气水合物的关系, 为更深层次的研究奠定了基础。

## 1 国内外泥火山的研究现状

早期关于泥火山的研究主要集中在陆上泥火山, 大部分研究只是对这种现象进行一些形态上的描述。20 世纪 90 年代以后, 泥火山的研究有了较大的发展, 科学家对陆上泥火山的分布、地表形态与结构、构造背景、活动特征和产物、形成机制以及对油气勘探的作用等进行了详尽的研究, 认为泥火山在油气勘探方面十分重要<sup>[9,13,14]</sup>。与此同时, 随着越来越先进的海洋科考设备的应用, 海底泥火山逐步得到广泛认识。有学者认为存在两种表现形式的泥火山<sup>[9]</sup>: 一种是基于底辟构造, 由强烈的底辟作用刺穿上覆沉积物形成, 这种泥火山规模较大。第二种是液化的沉积物沿断层和断裂体系向上迁移到达地表或海底表面, 形成泥火山建造。流体迁移在这类泥火山形成过程中起着根本性作用, 这种泥火山以泥岩角砾中高流体含量为特征, 形成较平坦的圆锥建造, 高出海底数米, 或是表现为从海底裂隙中喷出的泥流。

研究显示, 大多数的海底泥火山出现在具有挤压构造作用的增生楔中, 如地中海海脊<sup>[15,16]</sup>、巴巴

**基金项目:**国家自然科学基金项目:南海北部东沙西南海域泥火山的流体特征及其活动历史(41576035)

**作者简介:**李进(1992—),男,硕士生,主要从事海底泥火山及天然气水合物研究, E-mail: lijn115@mails.ucas.ac.cn

**通讯作者:**王淑红(1977—),女, E-mail: wshds@scsio.ac.cn

**收稿日期:**2017-04-30; **改回日期:**2017-07-07. 周立君编辑

多斯<sup>[17]</sup>、加的斯湾<sup>[18,19]</sup>和南海海槽<sup>[20]</sup>等;部分泥火山发生在伸展构造区,如黑海<sup>[21,22]</sup>和第勒尼安海东南部<sup>[23]</sup>;还有一些泥火山出现在挤压和伸展共存的构造区,如阿尔沃兰海西部海域<sup>[24-26]</sup>。由于海底泥火山能将沉积物深部的烃类气体(特别是甲烷)携带进入浅部沉积物、上覆水体<sup>[12]</sup>甚至大气圈从而对海底生态环境以及全球气候产生重要影响<sup>[26,27]</sup>,近 20 年来得到高度重视并已在全球范围内得到广泛研究<sup>[28-30]</sup>。目前国际上对于海底泥火山的研究涉及地质、地球物理、地球化学、生物、模拟计算及原位观测、环境影响等多学科领域,如利用地质地球物理方法调查流体通道<sup>[31]</sup>及分析泥火山的分布特征;利用甲烷源自生碳酸盐岩探讨泥火山区烃类气体的渗漏<sup>[32]</sup>及与天然气水合物之间的关系<sup>[33]</sup>;采用新的气体地球化学方法<sup>[34,35]</sup>及上覆水体中的气体特征及同位素组成等指标确定海底泥火山区深部气体的释放和来源;采用原位观测方法确定深海泥火山释放的甲烷对上覆水体的影响以及气体进入海水的生物地球化学过程<sup>[36]</sup>等。据此,获得了对海底泥火山的流体来源与特征、释放的烃类气体对环境的影响及与天然气水合物之间的关系等方面一系列的新认识。

此外,近几年科学家对马里亚纳海沟的研究发现,该地区发育大量蛇纹石化的泥火山,最大规模直径可达 25 km、高 2 km<sup>[37]</sup>。蛇纹石化的泥火山喷出物质主要是蛇纹石泥浆,这是由于超基性橄榄岩在海底与水、幔源无机碳等发生了费托聚合反应生成非生物成因甲烷<sup>[38]</sup>。IODP(国际大洋钻探计划)366 航次(2016.12.08-2017.02.07)在马里亚纳海沟俯冲带上针对蛇纹石化的泥火山钻探,其目的是在非增生会聚板块边缘的俯冲带内检验物质运移的过程,探讨超基性岩石的水岩反应以及蛇纹石化泥火山深部特征,除此之外还涉及到该区微生物以及地震等方面的研究。总之,国际上关于蛇纹石化泥火山的研究也才刚刚起步,其对于地球早期生命的起源与演化有重要影响<sup>[39-41]</sup>。

国内对于泥火山的研究起步相对较晚,最早的调查研究也是始于陆上<sup>[42-44]</sup>。而对海底泥火山的真正关注和研究源于近 10 年来对海洋油气和天然气水合物的深入调查和研究工作<sup>[1,7,45-52]</sup>。目前,已先后在我国海域多处海底发现泥火山的存在,其中比较典型的泥火山区包括冲绳海槽、南海台西南盆地及东沙西南海域。东海大陆架边缘和冲绳海槽西坡的泥火山直径从数十米到数百米不等,高出海底数米到 40 m,高分辨率地震资料显示,该泥火山区很

可能与天然气水合物有关<sup>[1,45,53]</sup>。台西南盆地是南海较早发现海底泥火山的海域,泥火山主要出现于盆地南部凹陷陆坡(水深 300~2 000 m)的深水区,已发现的 70 多座泥火山,喷口直径 100~200 m,大多分布于高雄海岸带、靠近高屏的海底峡谷带、枋寮海底峡谷带和永安线形构造带<sup>[54]</sup>。目前对台西南盆地的海底泥火山已开展了地球物理<sup>[55,56]</sup>、地球化学<sup>[28,57]</sup>及原位观测<sup>[58]</sup>等多方面的调查研究工作,对其分布区域以及气体来源和组成等流体特征等有了较深入的认识,并在其中的深海泥火山区普遍发现有水合物存在的地球物理证据,该区也已成为水合物调查研究的重点区域。东沙西南海域泥火山是南海北部新近发现的一个面积达数百平方公里的活泥火山群<sup>[59,60]</sup>,多道反射偏移地震剖面及 CHIRP 浅地层剖面显示,在南海东沙群岛西南陆坡和白云凹陷东部陆坡之间的水深 600~1 000 m 陆坡上矗立着一系列高出周围海底 50~100 m 的丘形地质体,其内部地层发生褶皱,反射波呈现杂乱和空白,海底声波屏蔽严重,丘状构造带有气体羽状构造,从海底进入水体高达 50 m,构成一个典型的尚在活动的泥火山群<sup>[61]</sup>。此外,该区泥火山表现出构造挤压和带状分布的特点,既不同于南海北部神狐和九龙甲烷礁已发现水合物区的非泥火山,也不同于全球其他典型被动大陆边缘的泥火山特征<sup>[61]</sup>。而且,此前已在该泥火山区海底的多个站位采集到致密的碳酸盐岩样品,并研究证明这些碳酸盐岩为与水合物分解有关的冷泉碳酸盐岩<sup>[62]</sup>,预示该区可能是一个重要的水合物潜在区。目前对该泥火山区的成因机制还不清楚,它是否与水合物有关及其水合物发育潜力如何还有待深入研究。

## 2 泥火山的分布特征

### 2.1 全球泥火山的分布特征

迄今为止,全球有报道的泥火山有 1 100 多座,主要分布在 44 个陆上地区和 21 个海域<sup>[63]</sup>。另外,大陆坡和深海平原地区可能还存在 1 000~100 000 座泥火山<sup>[9,63]</sup>。尽管很多学者估算了泥火山的数量,但泥火山的众多不确定因素导致其数量的统计存在不确定性。陆上泥火山虽然肉眼可以辨别,但很多小型、微型泥火山并未纳入统计序列,而海底泥火山由于调查资料不足及调查设备的限制致使其数量难以准确统计。泥火山的规模不及岩浆火山庞大,集中分布在地中海-喜马拉雅活动带和环太平洋

活动带(图1)<sup>[63]</sup>。大量的研究资料显示,在西西里岛、地中海、黑海、南里海、伊朗、巴基斯坦、印度、缅甸、中国南海一带以及菲律宾 Nanki 海槽、台湾南部、日本北海道、马来西亚、阿留申地区、美国西海岸、墨西哥湾、加勒比海等都有泥火山的发育<sup>[9,12,64,65]</sup>。泥火山一般形成于构造挤压环境,而以上两个构造带刚好是位于板块挤压边界。在两大构造带中地中海-喜马拉雅活动带上集中了超过50%的泥火山<sup>[12]</sup>。其中位于该带的南里海地区泥火山活动尤为活跃,这里大约集中了已知泥火山数量的30%<sup>[66]</sup>,南里海盆地一直被公认为泥火山地质研究理想的天然实验室。在里海南部阿塞拜疆地区及其毗邻地区有超过300座泥火山,包括所有类型的泥火山(正在活动喷发的、休眠的、不再喷发的、陆上的、海底的、含油气和不含油气的)都有存在<sup>[64]</sup>。Lokbatan 泥火山是阿塞拜疆最活跃的泥火山,自1829年至今已经喷发了24次,最近的一次喷发是在2012年9月。Dashgil 泥火山是间歇型喷发泥火山,每3~5分钟喷发一次,喷发的泥水混合物可达

1.5 m。Toragay 泥火山喷口直径在500 m左右,并且其有记录的喷发就有10次,每次喷发都伴随着巨大的柱状火焰(图2)。

除上述两大构造带外,北大西洋的格林兰地区、非洲东部坦桑尼亚地区以及澳大利亚中部等地区也有少量泥火山的发现<sup>[6,9,12,65]</sup>。最近,有相关报道指出在马里亚纳海沟地区也发现有大量泥火山<sup>[37,67-69]</sup>,其喷出的泥浆多为蛇纹石化的黏土。该地区发育的泥火山其喷出物质以及形成机制都与传统泥火山具有很大不同,但甲烷含量同样非常高,与其他泥火山不同的是:蛇纹石化泥火山释放的甲烷为无机甲烷,并非热解成因或者生物成因。这种在俯冲带大量生成的无机甲烷很有可能对早期物质由无机到有机的演化有着极其重要的作用,科学意义重大<sup>[39,40,70]</sup>。蛇纹石化泥火山深部发生着复杂的化学反应,超基性岩石与海底幔源无机碳、海水等相互作用生成蛇纹石、无机甲烷等<sup>[40,41]</sup>。生成的蛇纹石在深部大量积累,后期受到深部热源作用以及构造运动作用形成底辟构造并喷出海底形成海底泥火山。

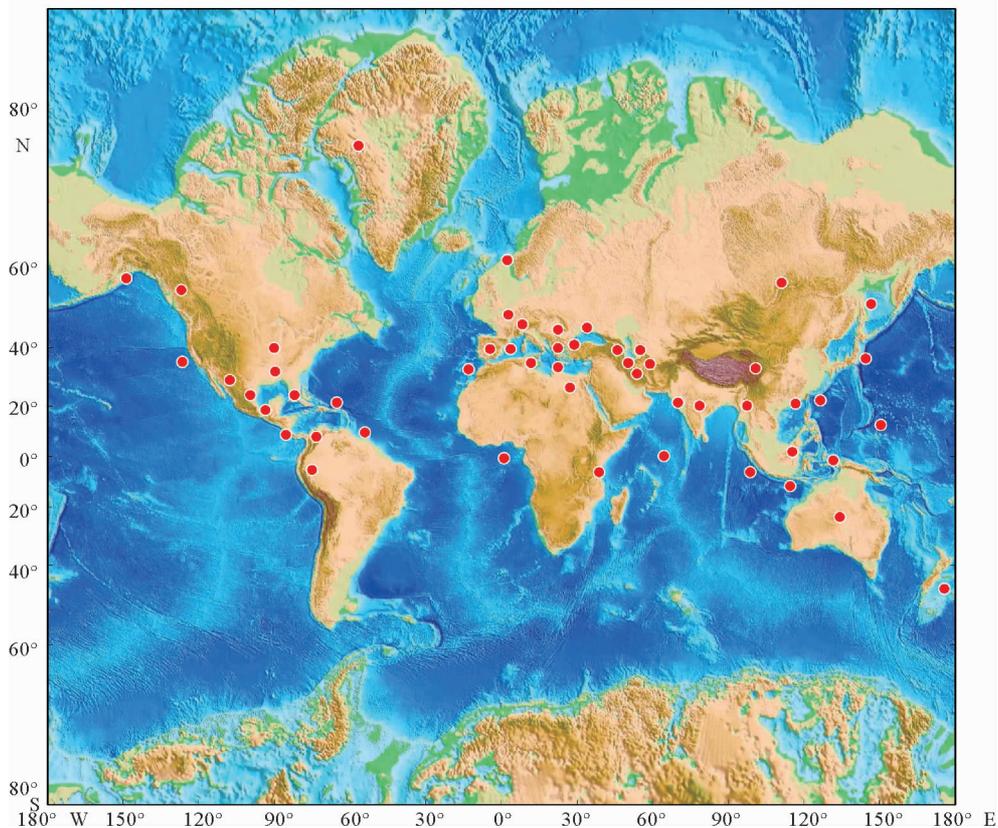
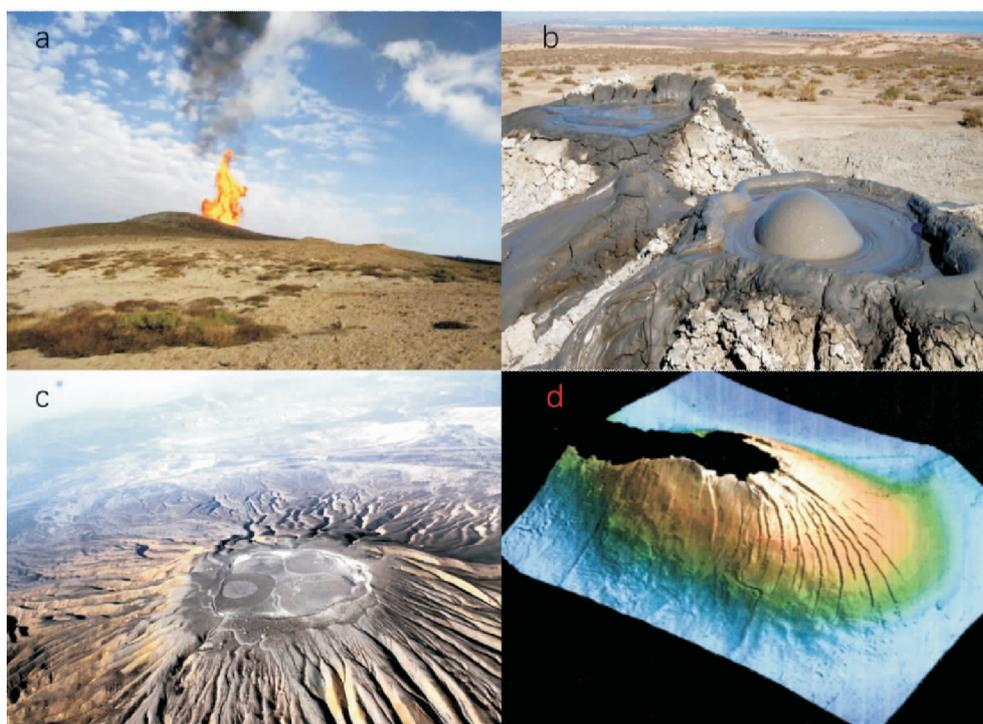


图1 世界泥火山分布图(据 Achim J. Kopf, 2000 修改)

Fig. 1 Distribution of mud volcanoes worldwide

图 2 阿塞拜疆地区四座著名泥火山<sup>[64]</sup>

(a. Lokbatan 泥火山,世界上爆破式喷发次数最多的泥火山;b. Dashgil 泥火山火山喷口;  
c. Toragay 泥火山喷口直径 500 m;d. 纳希切万地区海底泥火山 3D 影像图)

Fig. 2 Four famous mud volcanoes in Azerbaijan region

## 2.2 国内泥火山的分布特征

虽然近三十多年来国内的泥火山才开始受到关注,但大量调查性研究已经给出了国内泥火山的发育规模和分布位置。陆上泥火山主要分布在新疆天山北麓、准噶尔盆地南缘凹陷带<sup>[42,71]</sup>、台湾南部高雄和屏东一带<sup>[8,49]</sup>、西藏可可西里地区<sup>[43]</sup>,近年来我国学者在羌塘中部<sup>[72]</sup>进行地质调查时也发现大量曾经活动的泥火山群,另外也有资料指出在四川渠江<sup>[73]</sup>、江苏南部发现有规模较小但仍然活动的泥火山。海底泥火山的研究工作始于 20 世纪末,目前通过多波束成像、海底多道地震、浅地层剖面等技术手段已经探明在我国南海有大量泥底辟/泥火山的存在,主要分布在南海东沙群岛附近及其西南海域、琼东南海域、莺歌海盆地,以及台西南海域<sup>[2,4,59,60]</sup>。另外,在冲绳海槽也有少量泥火山的发现<sup>[1,45]</sup>。整体来说我国泥火山的分布特征有以下几点:(1)普遍发育在沉积较厚的地层中,出露展布受到区域断层控制明显;(2)陆上泥火山成群分布,单个规模较小,喷出泥浆中往往含有沥青脉或者油气残留<sup>[72]</sup>;(3)油气和水合物的形成与海底泥火山有关,单个泥火山规模较大(最大面积超过 700 km<sup>2</sup>)<sup>[5]</sup>,相当于北京五环内的面积。

南海海域地理位置特殊,受欧亚板块、太平洋板块以及菲律宾板块作用,构造活动频繁,断层发育,同时长期接受来自北部、西部、东部的沉积补充,物源丰富,沉积速率快,为泥火山的发育奠定了良好的地质条件。

南海北部莺歌海盆地沉积有巨厚的新近纪欠压实泥页岩地层,厚度可逾万米,为泥火山的发育提供了充足的物质来源<sup>[2]</sup>。莺歌海盆地中央拗陷带发育了大量泥底辟<sup>[5]</sup>。根据已探明的资料显示,该地区泥火山在空间分布上呈北西方向展布,泥底辟大多分布在莺西断裂带和红河走滑断裂之间且方向与断裂带呈同向延伸<sup>[2]</sup>。

南海北部琼东南地区发现疑似泥火山区域,分布在水深几百米到两千米不等,总体规模不大,单个泥火山之间较为分散,呈北东方向展布<sup>[2]</sup>。

地球物理调查发现,东沙西南海域发育有大量的丘状构造群,这些丘状构造有的目前仍在活动,有的已经停止活动形成碳酸盐岩丘<sup>[61]</sup>。在该海域开展的大量工作采集到许多珍贵的研究样品,其中我们所测的底层水样品甲烷浓度高达 17 nmol/L(未发表数据),远远高于正常海水中甲烷的浓度(0.5~2 nmol/L);采集的碳酸盐岩结壳呈现蜂窝状,推测是深部气体渗漏的痕迹<sup>[74]</sup>。

台湾西南部海域发育大量泥火山,规模相对其他海域较大,一般直径 100 m 到 200 m 不等,高出海底 15~50 m<sup>[8,49]</sup>,与台湾南部高雄、屏东地区的陆上泥火山在空间分布上具有密切联系,都是受到台西南断裂带作用影响。

冲绳海槽南部发育一系列泥火山/泥底辟,地形上表现为泥火山地貌,在穿过泥火山的地震剖面上,表现出典型的泥底辟构造,并且有证据表明该海域泥火山/泥底辟附近存在天然气水合物<sup>[1,45]</sup>。

### 3 海底泥火山与油气和天然气水合物的关系

海底泥火山通常发源于巨厚沉积层深部,在沉

积层深部气体、流体聚集膨胀作用下形成底辟构造,此时发育底辟构造的区域往往具有密度倒置的现象<sup>[4]</sup>,因此密度倒置也是识别泥火山的一个重要标志<sup>[9]</sup>。气体、流体不断聚集上拱,当上覆地层无法承受压力或者受到构造运动作用发生地层破裂时即可形成泥火山。海底泥火山形成后不断向海底喷发释放气体(甲烷、乙烷、丙烷、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>等,其中甲烷含量通常很高),其中的甲烷等气体可在适宜的温压条件下形成天然气水合物。因此,泥火山是连接深层油气和海底浅部水合物的通道,在空间上其向下追溯与油气的形成相关<sup>[46]</sup>,向上追溯与水合物的形成相关<sup>[47]</sup>,可以说泥火山与油气和水合物之间都具有成因耦合联系(图 3)<sup>[2,75]</sup>。

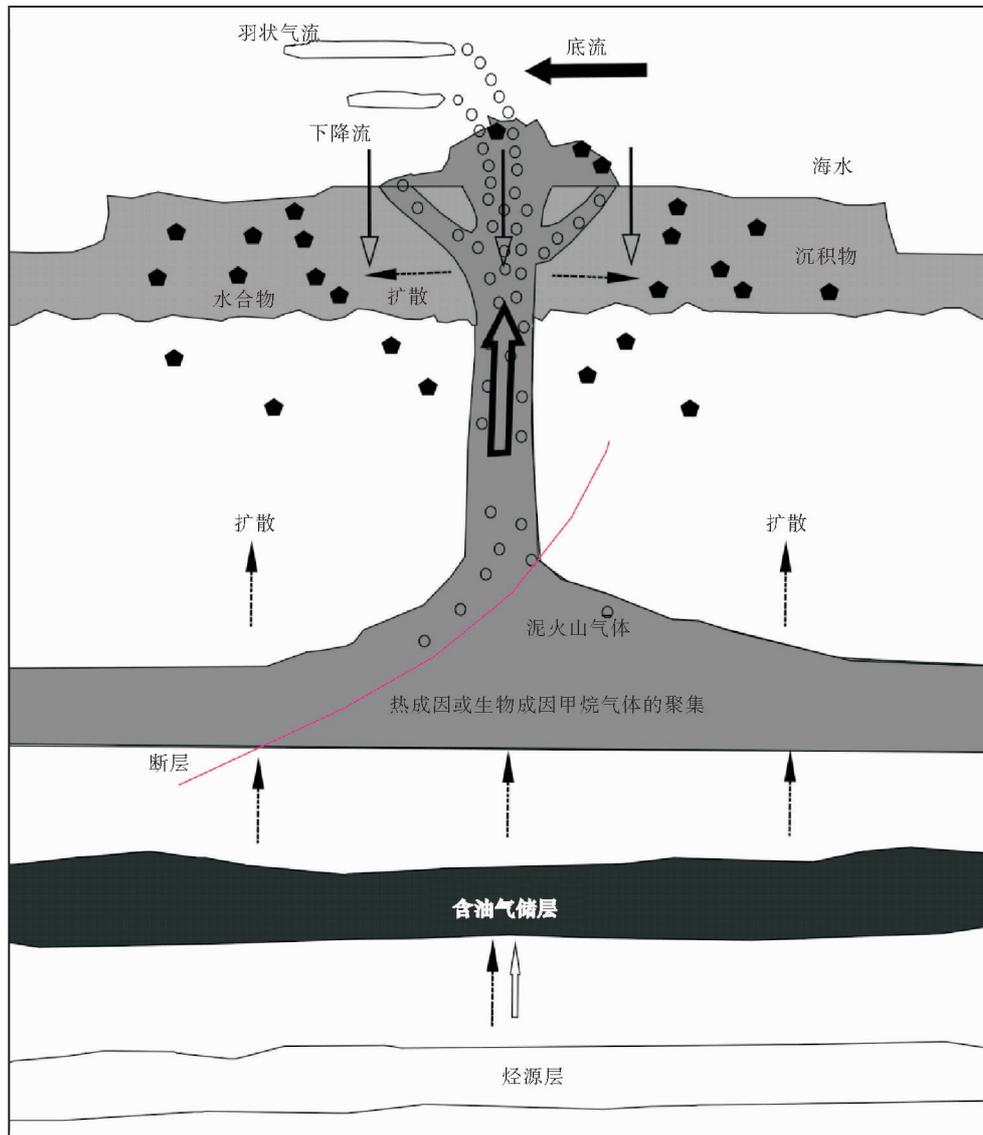


图 3 海底泥火山与油气和天然气水合物的关系(修改自文献 76)  
Fig. 3 The relationship of oil-gas and gas hydrate to a mud volcano

### 3.1 海底泥火山与油气的关系

由于泥火山的喷出物中往往伴随有沥青、油膜等出现,充分说明泥火山喷出物质的来源很有可能就是生油层或者储油层<sup>[2,5,49,50]</sup>。也有学者认为泥火山就是油气苗的一种,与油气具有直接关系<sup>[46]</sup>。

已有的研究发现海底泥火山与油气具有密切的联系:

(1)泥火山发育区与油气发育区同样具有沉积层厚度大、沉积速率快且未被压实的特点。南海北部沉积层厚度可达万米;泥火山发育密集的里海南部地区,沉积层厚度同样达到上万米,沉积最厚处达到 25~30 km<sup>[77]</sup>。泥火山常发育在古近纪或新近纪以来的快速沉积层中,我国莺歌海盆地泥火山发育于新近纪中新统<sup>[2]</sup>,西南里海盆地泥火山发育于古近纪地层<sup>[77]</sup>。

(2)海底泥火山形成演化过程中深部物质不断膨胀向上运移形成底辟构造,对油气的储藏和运移起着很好的圈闭作用<sup>[5,49]</sup>。当强烈的底辟上拱作用形成背斜隆起,沿隆起中心将会形成环形分布的正断层,这种构造会对下部含油气地层形成断层圈闭,例如南里海 Kursenge 南构造就是由于底辟作用形成的断层圈闭构造<sup>[77]</sup>。

(3)泥火山通道也是油气的运移通道。当泥底辟上拱刺穿上覆地层或者受到断层等构造作用形成泥火山后将释放底辟构造内部压力,油气将混合泥火山气体和流体、泥浆等向喷口泄漏,形成一种特殊的油气苗<sup>[46]</sup>。

(4)泥火山发育之初由于不断增强的底辟作用导致其内部压力和温度不断增加提供了生烃的热动力条件,在活动的泥火山喷口可以探测到异常高的大地热流值<sup>[78]</sup>。泥火山气体和流体的垂向运移还将把热量由深部向浅部输送,为浅部地层提供生烃热动力。

### 3.2 海底泥火山与天然气水合物的关系

除南海已探测到泥火山附近发育有水合物外,黑海、里海、鄂霍茨克海、挪威海、格陵兰南部海域和贝加尔湖等,都已发现存在水合物的海底泥火山<sup>[48]</sup>。海底泥火山与天然气水合物之间具有密切关系<sup>[7,47,75,78]</sup>,其深部产生的甲烷等气体上升往往聚集在泥火山顶部,为水合物的形成提供了充足的气体来源。在合适的温压条件下大量聚集的甲烷气体形成水合物,水合物形成后以各种不规则物理形态填充在泥火山周围的裂隙中又对泥火山起到一定

的封盖作用<sup>[78]</sup>。但是,黑海、里海、地中海及巴巴多斯海等海区的研究显示,并非所有泥火山区都发育水合物<sup>[78,79]</sup>,原因可能包括:(1)水合物的成藏是动态的,其形成后并非稳定不变,一旦发生海平面及气候条件变化或者受到构造抬升等作用破坏了水合物存在的温压体系,水合物将会发生分解;(2)水合物形成需要相应环境,沉积物粒度<sup>[80-82]</sup>、泥火山喷出物质温度<sup>[83]</sup>、地形地貌等都会影响水合物的形成;(3)海底泥火山发育区会形成大量放射状沟壑(图 2d)<sup>[64]</sup>,形成于沟壑附近的水合物在强烈的海底洋流冲刷作用下会很快分解;(4)部分泥火山喷发释放的气体中甲烷含量较低,不利于水合物形成或者形成的水合物含量较低。

水合物勘探中通常会发现泥火山与似海底反射(bottom simulating reflector,简称 BSR)在空间分布上具有良好的匹配关系<sup>[78,83]</sup>。BSR 指示含水合物沉积层与含游离气沉积层或含水沉积层的相边界<sup>[84]</sup>,在地震剖面上通常表现出与海底大致平行、与沉积层理斜交的特点。一般而言,有 BSR 伴生的泥火山地区往往有水合物产出<sup>[78]</sup>。

## 4 结论

(1)全球的泥火山主要分布在地中海-喜马拉雅带和环太平洋带上,其中南里海、黑海地区泥火山尤为发育,世界上最大的泥火山发育在南里海的阿塞拜疆地区。泥火山发育受构造因素、流体因素、气源因素等制约,因此其分布不及岩浆火山广泛,但其规模也相当可观。国内的海底泥火山主要分布在南海北部的莺歌海盆地、琼东南盆地、东沙西南海域、台湾西南海域以及冲绳海槽等海区且规模较大。

(2)海底泥火山与深部油气及浅部水合物之间具有密切联系。海底泥火山为油气的生成、储存和运输提供了热动力、构造圈闭和运移通道等条件;海底泥火山喷发释放的气体中甲烷含量高,在一定温压条件下往往在泥火山喷口附近形成水合物。据估算我国南海水合物储量巨大,有可观的经济价值;有些泥火山还可指示油气藏以及黄铁矿等其他矿藏的存在。泥火山喷发释放到水体和大气中的甲烷和二氧化碳量级可观,对全球气候变化产生巨大影响。

(3)目前发现于马里亚纳海沟俯冲上盘的蛇纹石化泥火山规模巨大,而且其形成机制与传统泥火山具有很大区别,蛇纹石化泥火山深部反应形成的无机甲烷可能对早期生命的形成与演化起着巨大作用,是联接早期物质由无机到有机演化极其重要的

地质纽带,是今后国内外泥火山研究的新热点。

**致谢:**感谢两位审稿专家给出的众多宝贵修改意见和编辑的辛勤付出,在成文过程中得到刘金龙博士、Matthias Haeckel 博士和查财财博士的鼎力帮助,在此对他们一并致以诚挚的谢意。

### 参考文献(References)

- [1] 赵汗青,吴时国,徐宁,等.东海与泥底辟构造有关的天然气水合物初探[J].现代地质,2006,20(1):115-122. [ZHAO Hanqing, WU Ning, et al. The elementary research of gas hydrate associated with mud diapir structure in the East China Sea[J]. Geoscience, 2006, 20(1): 115-122.]
- [2] 张伟.南海北部主要盆地泥底辟/泥火山发育演化与油气及天然气水合物成矿成藏[D].中国科学院研究生院(广州地球化学研究所)博士学位论文,2016. [ZHANG Wei. Research on the development and evolution of mud diapir/mud volcano and their relationship with migration and accumulation of petroleum and natural gas-hydrate in Major Basins, Northern South China Sea[D]. Doctor Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry), 2016.]
- [3] 孟祥君,张训华,韩波,等.海底泥火山地球物理特征[J].海洋地质前沿,2012,28(12):6-9,45. [MENG Xiangjun, ZHANG Xunhua, HAN Bo, et al. The geophysical characteristics of submarine mud volcano[J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(12): 6-9, 45.]
- [4] 张伟,何家雄,卢振权,等.琼东南盆地疑似泥底辟与天然气水合物成矿成藏关系初探[J].天然气地球科学,2015,26(11):2185-2197. [ZHANG Wei, HE Jiaxiong, LU Zhenquan, et al. Preliminary study of the relationship between the suspected mud diapir and natural gas hydrate in the Qiongdongnan basin, northern South China Sea[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(11): 2185-2197.]
- [5] 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-中国地质大学学报,2010,35(1):75-86. [HE Jiaxiong, ZHU Youhai, WENG Rongnan, et al. Characters of north-west mud diapirs volcanoes in South China Sea and relationship between them and accumulation and migration of oil and gas[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(1): 75-86.]
- [6] 黄华谷,邸鹏飞,陈多福.泥火山的全球分布和研究进展[J].矿物岩石地球化学通报,2011,30(2):189-197. [HUANG Huagu, DI Pengfei, CHEN Duofu. Global distribution and research progress of mud volcanoes[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2011, 30(2): 189-197.]
- [7] Kopf A J. Significance of mud volcanism[J]. Reviews of Geophysics, 2002, 40(2): 1005
- [8] 梁杰,龚建明,陈建文.泥火山与天然气水合物[J].海洋地质动态,2006,22(12):20-23. [LIANG Jie, GONG Jianming, CHEN Jianwen. Mud volcanoes and natural gas hydrate [J]. Marine Geology Letters, 2006, 22(12): 20-23.]
- [9] Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates[J]. Marine Geology, 2000, 167(1-2): 29-42.
- [10] 朱婷婷,陆现彩,祝幼华,等.台湾西南部乌山顶泥火山的成因机制初探[J].岩石矿物学杂志,2009,28(5):465-472. [ZHU Tingting, LU Xiancai, ZHU Youhua, et al. A preliminary genetic study of the Wushanding mud volcano in southwestern Taiwan[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2009, 28(5): 465-472.]
- [11] Martinelli G, Panahi B. Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity [M]. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2005.
- [12] Dimitrov L I. Mud volcanoes—the most important pathway for degassing deeply buried sediments[J]. Earth-Science Reviews, 2002, 59(1-4): 49-76.
- [13] Graue K. Mud volcanoes in deepwater nigeria[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(8): 959-974.
- [14] Huguen C, Mascle J, Woodside J, et al. Mud volcanoes and mud domes of the central Mediterranean ridge: near-bottom and in situ observations[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2005, 52(10): 1911-1931.
- [15] Limonov A F, Woodside J M, Cita M B, et al. The Mediterranean ridge and related mud diapirism: a background[J]. Marine Geology, 1996, 132(1-4): 7-19.
- [16] Kopf A, Robertson A H F, Volkmann N. Origin of mud breccia from the Mediterranean Ridge accretionary complex based on evidence of the maturity of organic matter and related petrographic and regional tectonic evidence[J]. Marine Geology, 2000, 166(1-4): 65-82.
- [17] Brown K, Westbrook G K. Mud diapirism and subcretion in the Barbados Ridge accretionary complex: the role of fluids in accretionary processes[J]. Tectonics, 1998, 7(3): 613-640.
- [18] Somoza L, Díaz-del-Río V, León R, et al. Seabed morphology and hydrocarbon seepage in the Gulf of Cádiz mud volcano area: acoustic imagery, multibeam and ultra-high resolution seismic data[J]. Marine Geology, 2003, 195(1-4): 153-176.
- [19] León R, Somoza L, Medialdea T, et al. Sea-floor features related to hydrocarbon seeps in deepwater carbonate-mud mounds of the Gulf of Cádiz: from mud flows to carbonate precipitates[J]. Geo-Marine Letters, 2007, 27(2-4): 237-247.
- [20] Kobayashi K, Ashi J, Boulegue J, et al. Deep-tow survey in the KAIKO-Nankai cold seepage areas[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1992, 109(3-4): 347-354.
- [21] Limonov A F, van Weering T C E, Kenyon N H, et al. Seabed morphology and gas venting in the Black Sea mudvolcano area: observations with the MAK-1 deep-tow sidescan sonar and bottom profiler[J]. Marine Geology, 1997, 137(1-2): 121-136.
- [22] Krastel S, Spiess V, Ivanov M, et al. Acoustic investigations of mud volcanoes in the Sorokin Trough, Black Sea[J]. Geo-

- Marine Letters, 2003, 23(3-4): 230-238.
- [23] Gamberi F, Marzia R. Mud diapirs, mud volcanoes and fluid flow in the rear of the Calabrian Arc Orogenic Wedge (south-eastern Tyrrhenian sea)[J]. Basin Research, 2010, 22(4): 452-464.
- [24] Talukder A R, Comas M C, Soto J I. Pliocene to recent mud diapirism and related mud volcanoes in the Alboran Sea (Western Mediterranean)[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 216(1): 443-459.
- [25] Pérez-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.
- [26] 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(3-4): 354-365.
- [27] Dimitrov L I. Mud volcanoes—a significant source of atmospheric methane [J]. Geo-Marine Letters, 2003, 23(3-4): 155-161.
- [28] Chao H C, You C F, Wang B S, et al. Boron isotopic composition of mud volcano fluids: implications for fluid migration in shallow subduction zones [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 305(1-2): 32-44.
- [29] Omeregic E O, Niemann H, Mastalerz V, et al. Microbial methane oxidation and sulfate reduction at cold seeps of the deep Eastern Mediterranean Sea [J]. Marine Geology, 2009, 261(1-4): 114-127.
- [30] Hensen C, Wallmann K, Schmidt M, et al. Fluid expulsion related to mud extrusion off Costa Rica—a window to the subducting slab [J]. Geology, 2004, 32(3): 201-204.
- [31] Accaino F, Bratus A, Conti S, et al. Fluid seepage in mud volcanoes of the northern Apennines: an integrated geophysical and geological study [J]. Journal of Applied Geophysics, 2007, 63(2): 90-101.
- [32] Vanneste H, Kastner M, James R H, et al. Authigenic carbonates from the Darwin Mud Volcano, Gulf of Cadiz: a record of palaeo-seepage of hydrocarbon bearing fluids [J]. Chemical Geology, 2012, 300-301: 24-39.
- [33] Aloisi G, Pierre C, Rouchy J M, et al. Methane-related authigenic carbonates of eastern Mediterranean Sea mud volcanoes and their possible relation to gas hydrate destabilisation [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 184(1): 321-338.
- [34] Mazzini A, Svensen H, Planke S, et al. When mud volcanoes sleep: Insight from seep geochemistry at the Dashgil mud volcano, Azerbaijan [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(9): 1704-1715.
- [35] Bonini M, Tassi F, Feyzullayev A A, et al. Deep gases discharged from mud volcanoes of Azerbaijan: new geochemical evidence [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 43: 450-463.
- [36] Zemskaia T I, Pogodaeva T V, Shubenkova O V, et al. Geochemical and microbiological characteristics of sediments near the Malenky mud volcano (Lake Baikal, Russia), with evidence of Archaea intermediate between the marine anaerobic methanotrophs ANME-2 and ANME-3 [J]. Geo-Marine Letters, 2010, 30(3-4): 411-425.
- [37] Fryer P, Lockwood J P, Becker N, et al. Significance of serpentine mud volcanism in convergent margins [J]. Special Paper-Geological Society of America, 2000, 349: 35-51.
- [38] 张明峰, 王先彬, 妥进才, 等. 蛇纹石化作用的气体形成研究进展 [J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(1): 11-20. [ZHANG Mingfeng, WANG Xianbin, TUO Jincan, et al. Review on gas formation of serpentinization [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(1): 11-20.]
- [39] 王先彬, 卓胜广, 张明峰, 等. 蛇纹岩中蛇纹石化作用, 分子氢和前生命/生命有机质—寻觅过去生命证据 [C]//中国矿物岩石地球化学学会第 15 届学术年会论文摘要集(2). 长春: 中国矿物岩石地球化学学会, 2015: 2. [WANG Xianbin, ZHUO Shengguang, ZHANG Mingfeng, et al. Serpentine petrophysization, molecular hydrogen and pre-life/life organic matter in ophiolite-looking for evidence of past life [C]//Chinese society for Mineralogy, Petrology Geochemistry, Collection of Abstract Papers of the 15th Academic Conference(2). Changchun: Chinese Society for Mineralogy, Petrology Geochemistry, 2015: 2.]
- [40] 王先彬. 蛇纹石化作用与地球生命起源/演化的痕迹 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(2): 205-211. [WANG Xianbin. Serpentinization and the traces of origin and evolution of life in the earth [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(2): 205-211.]
- [41] 王先彬, 张明峰, 卓胜广, 等. 蛇纹石化橄榄岩的有机化合物与生物成因性探索 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(2): 222-230. [WANG Xianbin, ZHANG Mingfeng, ZHUO Shengguang, et al. The organic compounds in the serpentinized peridotite and their biogenesis [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(2): 222-230.]
- [42] 王道, 李茂玮, 李锰, 等. 新疆独山子泥火山喷发的初步研究 [J]. 地震地质, 1997, 19(1): 14-16. [WANG Dao, LI Maowei, LI Men, et al. A preliminary study on eruption of the mud volcano in Dushanzi, Xinjiang [J]. Seismology and Geology, 1997, 19(1): 14-16.]
- [43] 胡东生, 张华京. 青藏高原可可西里地区玛章错钦湖畔苟纠麦尔沟的泥火山机理综述 [J]. 干旱区地理, 1998, 21(3): 13-18. [HU Dongsheng, ZHANG Huajing. A preliminary study on the mud volcanic mechanism of Goujiumaiga gully in Kekexili region, Qinghai—Xizang Plateau [J]. Arid Land Geography, 1998, 21(3): 13-18.]
- [44] 李锰, 王道, 李茂伟, 等. 新疆独山子泥火山喷发特征的研究 [J]. 内陆地震, 1996, 10(4): 359-362. [LI Meng, WANG Dao, LI Maowei, et al. A research on eruption characteristics of Dushanzi mud volcano in Xinjiang [J]. Inland Earthquake, 1996, 10(4): 359-362.]
- [45] 方银霞, 高金耀, 黎明碧, 等. 冲绳海槽天然气水合物与地质构造的关系 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(1):

- 85-91. [FANG Yinxia, GAO Jinyao, LI Mingbi, et al. Relation between gas hydrate and geologic structures in the Okinawa trough[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(1): 85-91.]
- [46] 范卫平, 郑雷清, 龚建华, 等. 泥火山的形成及其与油气的关系[J]. *吐哈油气*, 2007(1): 43-47. [FAN Weipin, ZHENG Leiqing, GONG Jianhua, et al. Forming of mud volcano and relation with hydrocarbon[J]. *Tuha oil & Gas*, 2007(1): 43-47.]
- [47] 沙志彬, 张光学, 梁金强, 等. 泥火山——天然气水合物存在的活证据[J]. *南海地质研究*, 2005(1): 48-56. [SHA Zhibin, ZHANG Guangxue, LIANG Jinqiang, et al. Mud volcano—one live evidence of the existence of gas hydrates[J]. *Research of Geological South China Sea*, 2005(1): 48-56.]
- [48] 沙志彬, 王宏斌, 张光学, 等. 底辟构造与天然气水合物的成矿关系[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 283-288. [SHA Zhibin, WANG Hongbin, ZHANG Guangxue, et al. The relationships between diapir structure and gas hydrate mineralization[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 283-288.]
- [49] 何家雄, 崔洁, 翁荣南, 等. 台湾南部泥火山与伴生气地质地球化学特征及其油气地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(2): 319-326. [HE Jiexiong, CUI Jie, WENG Rongnan, et al. Geology of Mud volcanoes and geochemistry of associated gas in southern Taiwan and Its significance to petroleum geology[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(2): 319-326.]
- [50] 陈胜红, 贺振华, 何家雄, 等. 南海东北部边缘台西南盆地泥火山特征及其与油气运聚关系[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(6): 872-878. [CHENG Shenghong, HE Zhenhua, HE Jiexiong, et al. The characters of the mud volcanoes in the north-east marginal of the South China Sea and the relationship with the accumulation and migration of oil and gas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(6): 872-878.]
- [51] 何家雄, 祝有海, 马文宏, 等. 火山、泥火山/泥底辟及含气陷阱与油气运聚关系[J]. *中国地质*, 2010, 37(6): 1720-1732. [HE Jiexiong, ZHU Youhai, MA Wenhong, et al. Volcanoes, mud volcanoes/mud diapirs and gas traps and their relationship with oil and gas[J]. *Geology in China*, 2010, 37(6): 1720-1732.]
- [52] 谢蕾, 王家生, 吴能友, 等. 南海北部神狐海域浅表层沉积物中自生黄铁矿及其泥火山指示意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(3): 351-359. [XIE Lei, WANG Jiasheng, WU Nengyou, et al. Characteristics of authigenic pyrites in shallow core sediments in the Shenhu area of the northern South China Sea: implications for a possible mud volcano environment[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(4): 541-548.]
- [53] Yin P, Berné S, Vagner P, et al. Mud volcanoes at the shelf margin of the East China Sea[J]. *Marine Geology*, 2003, 194(3-4): 135-149.
- [54] Yang T F. Recent progress in the application of gas geochemistry: examples from Taiwan and the 9th International Gas Geochemistry Conference[J]. *Geofluids*, 2008, 8(4): 219-229.
- [55] Chow J J, Chang S K, Yu H S. GPR reflection characteristics and depositional models of mud volcanic sediments—Wushanting mud volcano field, southwestern Taiwan[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2006, 60(3-4): 179-200.
- [56] Chen S C, Hsu S K, Wang Y S, et al. Distribution and characters of the mud diapirs and mud volcanoes off southwest Taiwan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 92: 201-214.
- [57] 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.
- [58] Hong W L, Etiope G, Yang T F, et al. Methane flux from miniseepage in mud volcanoes of SW Taiwan; Comparison with the data from Italy, Romania, and Azerbaijan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 65: 3-12.
- [59] 赵旭, 阎贫, 王彦林, 等. 东沙西南海区泥火山的分布及其物质来源层位[J]. *热带海洋学报*, 2016, 35(5): 88-96. [ZHAO Xu, YAN Pin, WANG Yanlin, et al. The distribution and provenance strata of mud volcanoes in the waters southwest of the Dongsha Islands[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2016, 35(5): 88-96.]
- [60] 陈森, 阎贫, 王彦林. 东沙群岛西南泥火山区 Chirp 浅剖数据的海底物性反演[J]. *地球科学*, 2016, 41(3): 425-432. [CHEN Sen, YAN Pin, WANG Yanlin. Inversion of the physical properties of the seabed using chirp sub-bottom data in mud volcanoes field of the southwest of Dongsha island[J]. *Earth Science*, 2016, 41(3): 425-432.]
- [61] 阎贫, 王彦林, 郑红波, 等. 东沙群岛西南海区泥火山的地球物理特征[J]. *海洋学报*, 2014, 36(7): 142-148. [YAN Pin, WANG Yanlin, ZHENG Hongbo, et al. Geophysical features of mud volcanoes in the waters southwest of the Dongsha Islands[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(7): 142-148.]
- [62] Wang S H, Yan W, Magalhães H V, et al. Calcium isotope fractionation and its controlling factors over authigenic carbonates in the cold seeps of the northern South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(11): 1325-1332.
- [63] 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(2): 1037.
- [64] Alizadeh A, Guliyev I S, Kadirov F A, et al. *Geosciences of Azerbaijan: Volume I: Geology*[M]. Switzerland: Springer, 1-246.
- [65] Kopf A J. Significance of mud volcanism[J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40(2): 1005.
- [66] 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.
- [67] Campbell K A, Farmer J D, Des Marais D. Ancient hydrocarbon seeps from the Mesozoic convergent margin of Califor-

- nia: carbonate geochemistry, fluids and palaeoenvironments [J]. *Geofluids*, 2002, 2(2): 63-94.
- [68] Curtis A C, Wheat C G, Fryer P, et al. Mariana forearc serpentinite mud volcanoes harbor novel communities of extremophilic *Archaea*[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2013, 30(5): 430-441.
- [69] Suess E. Marine cold seeps and their manifestations: geological control, biogeochemical criteria and environmental conditions[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2014, 103(7): 1889-1916.
- [70] 王先彬, 欧阳自远, 卓胜广, 等. 蛇纹石化作用、非生物成因有机化合物与深部生命[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(6): 1096-1106. [WANG Xianbin, OUYANG Ziyuan, ZHUO Shengguang, et al. Serpentinization, abiogenic organic compounds, and deep life[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 44(6): 1096-1106.]
- [71] 高小其, 梁卉, 王海涛, 等. 北天山地区泥火山的地球化学成因[J]. *地震地质*, 2015, 37(4): 1215-1224. [GAO Xiaoqi, LIANG Hui, WANG Haitao, et al. Origin of the mud volcano in northern Tianshan constrained by geochemical investigation[J]. *Seismology and Geology*, 2015, 37(4): 1215-1224.]
- [72] 解超明, 李才, 李林庆, 等. 藏北羌塘中部首次发现泥火山[J]. *地质通报*, 2009, 28(9): 1319-1324. [XIE Chaoming, LI Cai, LI Linqing, et al. First discovery of mud volcanoes in central Qiangtang, northern Tibet, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(9): 1319-1324.]
- [73] 陈秉范. 四川盆地式泥火山的发现[J]. *地质论评*, 1946, 11(S1): 65-70. [CHENG Bingfan. Discovery of mud volcano in Sichuan Basin[J]. *Geological Review*, 1946, 11(S1): 65-70.]
- [74] 陈忠, 杨华平, 黄奇瑜, 等. 南海东沙西南海域冷泉碳酸盐岩特征及其意义[J]. *现代地质*, 2008, 22(3): 382-389. [CHEN Zhong, YANG Huaping, HUANG Qiyu, et al. Diagenetic environment and implication of seep carbonate precipitations from the southwestern Dongsha Area, South China Sea[J]. *Geoscience*, 2008, 22(3): 382-389.]
- [75] 刘金龙, 王淑红, 颜文. 海洋天然气水合物与深水油气共生关系探讨[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(2): 39-51. [LIU Jinlong, WANG Shuhong, YAN Wen. Research on coexistence between marine gas hydrate and deepwater oil [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(2): 39-51.]
- [76] Mastalerz V, de Lange G J, D? hlmann A, et al. Active venting at the Isis mud volcano, offshore Egypt: origin and migration of hydrocarbons[J]. *Chemical Geology*, 2007, 246(1-2): 87-106.
- [77] 段海岗, 陈开远, 史卜庆. 南里海盆地泥火山构造及其对油气成藏的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(3): 337-344. [DUAN Haigang, CHEN Kaiyuan, SHI Buqing. Mud volcano structure in South Caspian Basin and its impact upon hydrocarbon accumulation[J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(3): 337-344.]
- [78] 刘杰, 孙美静, 苏明, 等. 海底泥火山特征及其与天然气水合物的成矿关系[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(8): 53-61. [LIU Jie, SUN Meijing, SU Ming, et al. Submarine mud volcano and its relationship with gas hydrate[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(8): 53-61.]
- [79] 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.
- [80] 王家生, 高钰涯, 李清, 等. 沉积物粒度对水合物形成的制约: 来自 IODP 311 航次证据[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(7): 659-665. [WANG Jiasheng, GAO Yuya, LI Qing, et al. Grain size constraint on gas hydrate occurrence: evidence from sediment size during IODP 311[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(7): 659-665.]
- [81] Torres M E, Tréhu A M, Cespedes N, et al. Methane hydrate formation in turbidite sediments of northern Cascadia, IODP Expedition 311[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 271(1-4): 170-180.
- [82] Ginsburg G, Soloviev V, Matveeva T, et al. Sediment grain-size control on gas hydrate presence, site 994, 995, and 997 [C]//Proceedings of the Ocean Drilling Program. *Science Letter. Ocean Drilling Program*, 2000.
- [83] 吴能友, 梁金强, 王宏斌, 等. 海洋天然气水合物成藏系统研究进展[J]. *现代地质*, 2008, 22(3): 356-362. [WU Nengyou, LIANG Jinqiang, WANG Hongbin, et al. Marine gas hydrate system: state of the art[J]. *Geoscience*, 2008, 22(3): 356-362.]
- [84] 宋海斌, 张岭, 江为为, 等. 海洋天然气水合物的地球物理研究(III): 似海底反射[J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(2): 182-187. [SONG Haibin, ZHANG Ling, JIANG Weiwei, et al. Geophysical researches on marine gas hydrates (III): bottom simulating reflections [M]. *Progress in Geophysics*, 2003, 18(2): 182-187.]

## SEABED MUD VOLCANO AND ITS BEARING ON OIL-GAS AND GAS HYDRATE

LI Jin<sup>1,2</sup>, WANG Shuhong<sup>1</sup>, YAN Wen<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China; 2. University of Chinese Academy Sciences, Beijing 101408, China)

**Abstract:** Mud volcanoes have gradually become a world research focus for geosciences in the past decades, with the progress of marine exploration technology. Mud volcanoes in the world are mainly distributed in the Mediterranean-Caspian-Himalayan active belt and the Pacific activity belt, dominated by tectonic activities. Although the distribution of mud volcanoes is limited in the world, the research of it is of significance. The eruptive materials of the mud volcano may carry great amount of information of the interior Earth. Mud volcano is also bound up with the formation, migration and accumulation of deep oil and gas in terms of structural trapping, thermodynamic mechanism and developmental horizons. Moreover, there is high content of methane in the gas erupted together with the mud. On one hand, It will bring affect to marine water and atmospheric environment, and on the other hand, it will collect the gas in the seabed sediments to form gas hydrate. There are large amount of submarine mud volcanoes existed in the South China Sea. To intensively study those mud volcanoes in the South China Sea is important not only in exploring the migration and evolution of Earth interior material, but also the exploration and development of the oil and gas hydrate in the South China Sea basins.

**Key words:** mud volcano; oil-gas; gas hydrate; the South China Sea