

泥火山的全球分布和研究进展

黄华谷^{1,2}, 邸鹏飞^{1,2}, 陈多福¹

1. 中国科学院 广州地球化学研究所 边缘海地质重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

摘要: 本文系统介绍了泥火山的全球分布特征、分类、成矿、成因特征和机制、生物地球化学和地质灾害。泥火山是盆地地层深部含水的泥质物在高压作用下喷出地表形成的锥状沉积体, 主要发育在沉积速率较快和有横向挤压构造作用的盆地中。全球陆地有超过 40 个泥火山发育区, 海底有超过 20 个泥火山发育区, 每个发育区有几座到 200 多座泥火山不等, 陆地和浅海区共有 2000 多个泥火山。各地泥火山有不同的喷发周期, 喷发物也各有不同的形态、成分、来源和年龄。尽管泥火山的成因机制尚颇有争议, 但较快的沉积速率和活动大陆边缘横向构造挤压作用无疑是两个最为关键的因素。由于泥火山对大地构造属性、油气勘探、生物地球化学、地质灾害和全球气候变化等问题的研究有着重要的意义, 已逐渐成为地球科学一个新的研究热点。

关键词: 泥火山; 全球分布; 形成机制; 油气勘探; 地球化学

中图分类号: P618.13 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2011)02-0189-09

Global Distribution and Research Progress of Mud Volcanoes

HUANG Hua-gu^{1,2}, DI Peng-fei^{1,2}, CHEN Duo-fu¹

1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry,

Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: This paper reviews the domestic and international research progress on mud volcanoes. Their formation features and mechanisms, global distribution characteristics, classification, mineralization, biogeochemistry and geological hazards have been systematically reviewed. Mud volcanoes are the vertebra-shaped sedimentary bodies that were formed by the erupting of water containing muddy material from deep buried formations to the surface under high basin pressure. They widely distribute in the basin areas of having both high sediment accumulation rate and lateral tectonic compression. Mud volcanoes are documented at more than 40 onshore locations and more than 20 offshore locations worldwide, and the number of mud volcanoes in the onshore and the shallow water areas is more than 2000. Each of the mud volcanoes may have different eruption cycle and its effusive materials may have different forms, compositions, sources and ages. The formation mechanism of mud volcanoes is still a wide range of arguments, but high sedimentation rate and the lateral tectonic compression from the active continental margins are two key factors. Mud volcano has gradually become a new hotspot of geological science because of its great significance in tectonics study, oil and gas exploration, geological disasters, biogeochemistry, global climate change, and other major issues.

Key words: mud volcano; global distribution; formation mechanism; oil and gas exploration; geochemistry

收稿日期: 2010-10-12 收到, 11-19 改回

基金项目: 国家油气重大专项(2008ZX05026-004-09); 中国科学院知识创新工程前沿领域项目(KZCX2-YW-GJ03); 国家自然科学基金资助项目(40725011, U0733003)

第一作者简介: 黄华谷(1981-), 男, 博士研究生, 地球化学专业。E-mail: huanghg@gig.ac.cn.

通讯作者: 陈多福, 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事冷泉和天然气水合物研究。E-mail: cdf@gig.ac.cn.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

泥火山发育在沉积速率较快和有横向挤压构造作用的盆地中,以地下深部高压泥浆和气体为主的流体通过断层等高渗透性通道运移到地表,它是泥浆、水、沉积角砾和各种气体喷出、堆积在地表而形成的锥状沉积体,看起来它与岩浆-火山作用有类似之处,但泥火山所喷发的物质是地壳浅部的沉积物,而岩浆-火山作用所喷发的物质是来自地壳深部或地幔的岩浆^[1~4]。

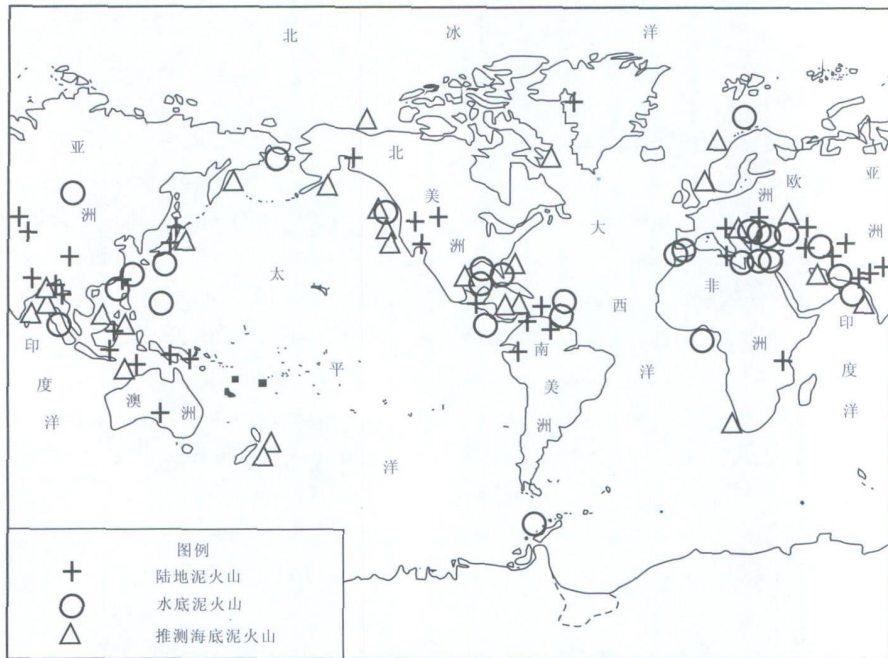
早在 200 多年前泥火山就引起了地质学家的关注。上世纪 90 年代以前,主要研究的是陆地泥火山的分布、地表形态与结构、构造背景、活动特征和产物、形成机制,以及对油气勘探的作用等;90 年代之后,对泥火山的研究才有了一个大的发展^[4,5],特别是 2003 年以后,泥火山吸引了愈来愈多学者的关注,研究成果也迅速增加。许多泥火山发育地区探明了深部有油气藏,部分油气藏还成功得到开发^[6,7]。此外,也发现 S、Hg 和 As 等元素的成矿与泥火山有关^[7]。不同泥火山在地表形成的沉积物不仅在形态、成分和年龄上有不同,而且物质来源深度大相径庭深度多为 2~ 15 km^[8]。此外,泥火山喷发向大气圈释放大量极强温室效应的甲烷气体,对全球

气候变化产生重要影响^[9]。因此,泥火山对于研究大地构造、油气勘探、地质灾害、生物地球化学、全球气候变化和深部岩石圈等问题有着重要意义^[4,10,11]。

我国有关泥火山的文献很少,且多侧重于报导性文章。本文旨在综述泥火山的全球分布和最新研究成果,以期推动我国的相关研究。

1 全球分布

目前全球泥火山的数量还是未知数,特别是海底泥火山的数量尚未可知^[2,12]。全球陆地有超过 40 个地区和海底有超过 20 个海域发育有泥火山,每个发育区有几座到 200 多座不等,陆地和浅海区已发现 2000 多座泥火山,大陆斜坡和深海区可能还会有 5000~ 10 000 座泥火山^[4,8,13]。已知的泥火山见于阿塞拜疆(巴库)、美国(黄石公园)、伊朗(马克兰)、罗马尼亚(布扎)、南里海、黑海、地中海、墨西哥湾、巴伦支海和波罗的海等地^[4,14,15]。我国海底和陆地至少有 11 处发现了 200 多座泥火山。从构造上说,泥火山主要发育于阿尔卑斯山-特提斯缝合带(阿尔卑斯山-黑海-里海-喜马拉雅山)和环太平洋带(图 1)^[6,16]。



据文献[8],[25]~[29]
from ref. [8],[25]~[29]

图 1 全球泥火山分布图

Fig. 1 Distribution of mud volcanoes worldwide

阿尔卑斯山-特提斯缝合带(阿尔卑斯山-黑海-里海-喜马拉雅山)最重要的泥火山发育区是阿塞拜

疆的巴库地区,它是全球泥火山发育数量最多的地方(约有 220 座),1801~ 2001 年有 85 座泥火山有

记录的喷发 270 次, 大约每年会有 2~ 5 座泥火山喷发; 这里也是目前泥火山研究最全面的地区, 对泥火山喷发的气体、固体和流体都有全面的研究^[1, 17, 18]。巴库地区最大的泥火山高 400 m, 分布面积 10 km², 并有石油和天然气喷出, 其中 Dashgil 泥火山保守的估计每年也有 1.5×10^7 m³ 的甲烷^[17, 18] 喷出。

西班牙西南部加的斯湾(Cadiz)的大部分泥火山都在水深 350~ 2000 m 的东部海底, 沿北东—南西和北西—南东两个方向呈带状分布, 零散分布于水深 2300~ 3900 m 的大陆斜坡处^[11]。挪威巴伦支海大陆边缘的 Haakon Mosby 泥火山在水深 1250 m 的海底, 直径约 1 km, 高出海底 8~ 10 m, 气体中富含甲烷^[19]。黑海的 Dvurechenskii 泥火山位于克里米亚半岛东南水深 800~ 2200 m 的索罗金(Serokin)海槽, 呈圆平顶状, 直径约 800 m, 高 80 m^[20]。东地中海的阿那克西曼德(Anaximander)是泥火山活动发育的重要区域, 其中 4 座泥火山产出天然气水合物^[21]。俄罗斯贝尔加湖是目前唯一陆内湖泊水底发现有泥火山的地区, 泥火山见于湖的南部, 水深 1370~ 1393 m^[22]。

新疆准噶尔盆地独山子西南 1 km 处有一个泥火山群, 面积约 0.5 km²。1995 年曾发生大规模喷发, 目前多数喷口已停止喷溢泥浆, 但仍有少量气体溢出^[3, 23, 24]。附近的乌苏白杨沟四棵树和艾渠沟也有两个泥火山群。前者的泥火山高 20 m 以上, 有 80 多个喷口, 每个喷口的直径都不超过 1 m, 个别还在间隙性地喷发。艾渠沟泥火山群有两座大小相当的泥火山, 喷口直径 1~ 2 m, 高约 9 m, 有油气喷出, 喷口泥浆中发现有微生物。

此外, 青藏高原羌塘盆地中部的戈木措(湖)中有一座高约 12 m 的泥火山, 喷发中心呈漏斗状, 直径超过 100 m, 中心部位深度超过 6 m, 喷发物中最大的灰岩块体体积有 5 m³ 以上^[25]。可可西里地区玛章错钦湖畔的苟纠麦尔沟有一座泥火山, 中心喷口呈圆形, 直径约 25 m, 喷出的气体有强烈的 H₂S 气味^[26]。此外, 四川达州渠县琅琊乡嘉陵江畔有强烈的天然气喷发, 泥火山的出露受江水涨落的影响^[27]。

环太平洋构造活动带主要发育海底泥火山, 少有陆地上的泥火山。最近在马里亚纳海沟首次发现蛇纹岩组成的泥火山。它们分布在马里亚纳海沟中轴线到岛弧边缘海域的海底, 纵向延伸 90 km, 它们的喷出物可能来自岛弧岩浆作用形成的蛇纹岩^[28]。此外, 南极大陆边缘设得兰群岛的边缘海域有 4 个泥火山带。这里水深 1615~ 2594 m, 泥火山高出海

底 115~ 255 m, 分布面积达 7.5~ 45.9 km², 并有天然气水合物喷出^[29]。

2006 年 5 月 29 日印度尼西亚爪哇岛发生强烈的泥火山喷发, 泥浆和气体的温度高达 100℃; 沉积物和流体来自地下 1300~ 1870 m 深的沉积层。喷发的第三天喷发速率达 50 000 m³/d, 当年 9 月的喷发速率达 180 000 m³/d。虽然大量泥浆流入附近的波龙河, 但截止 2008 年 6 月, 陆地泥浆的覆盖面积已达 8 km², 致使 4 万人流离失所^[30]。

东海大陆架边缘和冲绳海槽西坡也有泥火山, 直径从数十米到数百米不等, 高出海底数米到 40 m^[31]。南海台西南盆地是一个泥火山多发的海域, 泥火山出现于盆地南部凹陷陆坡(水深)300~ 2000 m 的深水区, 已发现 70 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^[32]。台湾岛的台南和高雄等 3 个地区发育有大量的泥火山, 目前仍有天然气喷出^[33, 34]。

2 特征和分类

泥火山喷发规模可与岩浆火山喷发相比, 甚至超过了岩浆型的火山, 如大的岩浆火山喷口直径 450~ 900 m, 泥火山的喷口直径则可达 300~ 1000 m, 有的甚至达 2 km 以上, 喷发高度也可达数百米^[35, 36]。小的喷口直径只有几厘米到几十厘米, 如新疆泥火山群是由众多小口径的泥火山组成; 喷发的沉积物可形成 20 度以上的坡度。喷出物的形态、成分和年龄也各不相同, 喷出物一般来自深 2~ 15 km 处^[16, 36, 37]。喷出物由沉积物和流体(水、盐类、石油、甲烷、CO₂ 等)组成。陆地泥火山的气体除了 60%~ 99% 的甲烷外, 还有 N₂ 和 CO₂ 等; 海底泥火山喷出的气体则还有 N₂、CO₂、其他碳氢化合物、硫化物和惰性气体^[2, 16, 38]。

不同泥火山的喷发周期的差别很大, 图 2 是特立尼达岛和阿塞拜疆的泥火山喷发周期示意图; 甚至同一泥火山喷发周期也有不同, 从几年到几十年不等^[1, 39]。特立尼达岛的 Columbus 泥火山分别在 1906 年、1935 年、1966 年和 1998 年发生喷发, 喷发周期大约为 30 a。而 Chatham 泥火山分别在 1911 年、1928 年、1964 年、2001 年和 2002 年, 喷发周期分别为 17 a、36 a、37 a 和 1 a, 似乎没有规律可循。

阿塞拜疆地区的 Shikhzagirli 泥火山喷发频繁, 上个世纪的 100 年间共喷发了 15 次, 周期为 2~ 14 a, 多数为 5~ 7 a。Lockbatan 泥火山在 1900 至 2001 年喷发了 18 次, 周期为 3~ 13 a 不等, 多数

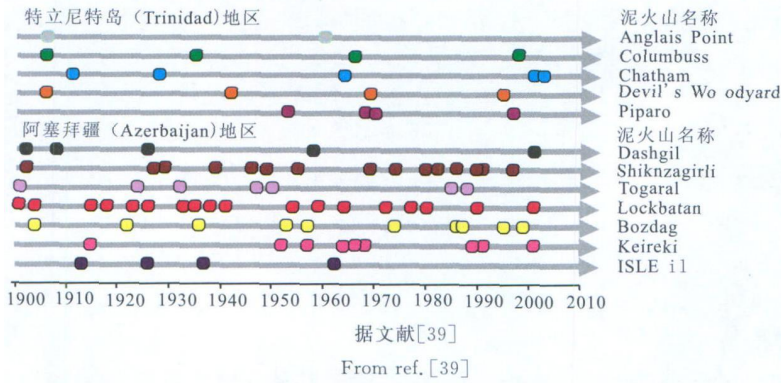


图2 特立尼达岛和阿塞拜疆两个地区主要泥火山喷发周期示意图

Fig. 2 Picture showing the eruption timing of the main mud volcanoes in Trinidad and Azerbaijan

为4~5 a。Dashgil 泥火山1900~2001年只喷发了五次(1902年、1908年、1926年、1958年和2001年),喷发周期分别是6 a、18 a、32 a和43 a。

泥火山的主要分类依据是:喷发特征、动力学背景和地形地貌等。文献[2]根据喷发特征将其分为3类:1) Lokbatan型:大多数处于平静期,短时间活跃,但喷发时强度极大,喷出的气体常常能燃烧。以2001年10月25日大爆发的阿塞拜疆的洛克巴坦(Lockbatan)泥火山为典型;2) Ckikishlyar型:这是长期活跃但强度较弱的泥火山。其特点是或多或少喷出一定量的含气泥浆和水;3) Schugin型:介于上述两类之间。特点是长时间的微弱活动和短时间的间隔喷发;分布最为广泛。

文献[40]的作者将泥火山分为4类:1) 强烈喷出大量气体和泥质物质,短时间的剧烈喷发,并常伴有气体自燃现象;2) 喷发物中有角砾和气体,气体一般不会自燃;3) 喷发低粘度泥浆和角砾,没有任何气体自燃现象;4) 喷发物为角砾和少量气体,一般持续喷发时间长(可达几年)。

有人^[41]统计了全球1226座泥火山,根据分布面积分成3类(表1):1) 小型泥火山:小于0.5 km²;2) 中型泥火山:0.5~9 km²;3) 大型泥火山:9 km²以上。已经发现至少有6个泥火山分布面积超过20 km²。

表1 泥火山的分类

Table 1 Classification of mud volcanoes

类型	陆地	浅海	面积/km ²	比例
小型泥火山	417	135	< 0.5	45%
中型泥火山	417	135	0.5~9	45%
大型泥火山	92	30	> 9	10%
总数(1226)	926	300	—	—

注:据文献[41]

3 成因机制

泥火山的形成机制主要有地震诱发、深部沉积物的固结状态与气体含量、断层活动,以及人工钻井等^[18,42,43]。早在19世纪中期就认识到泥火山与构造活动有关:它们多发生在大断层的交汇处。因此可以通过钻探和观察它与地震的关系来验证断层对泥火山的控制,并依据其发育情况判断断层及其走向^[36,38]。一般泥火山的喷发频率与地震有着一定的内在联系:地震过后不久,往往会发生泥火山喷发,如2001年1月26日影响印度西北部和巴基斯坦南部的7.7级大地震之后,巴基斯坦南部出现Kandewari泥火山喷发^[1,37,38,44~46]。

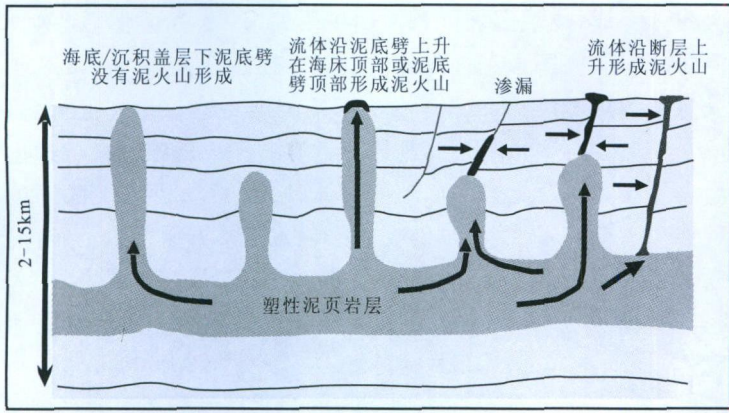
有人^[47]认为泥火山的形成主要与下列因素有关:1) 沉积速率大的沉积盆地;2) 有多量伊利石化的粘土矿物;3) 孔隙流体的膨胀;4) 深部有富含烃类的流体;5) 有不透水或低透水的上覆盖层;6) 盆地沉积物受到横向或垂向挤压;7) 地震活动。

陆地和海底泥火山的成因分类^[41]:1) 地质成因:主要有陆源沉积物组成的沉积厚盖层(8~22 km),含有塑性泥页岩层,岩石密度倒置,深部有气体聚集,地层压力异常高;2) 构造成因:沉积物堆积速率较高,或超覆逆冲层导致沉积盖层的沉降速度过快,出现泥底劈或背斜褶皱,有断层发育和横向构造挤压,地震活动和地壳的均衡过程;3) 地球化学成因:深部油气生成和粘土矿物的脱水反应;4) 水文地质成因:流体沿断裂流动。

多数学者认为泥火山形成有两个关键因素:较快的沉积速率和活动大陆边缘的横向构造挤压。研究表明,海底泥火山的形成有两个基本过程(图3):首先是泥火山直接发育在海底,或流体刺穿泥底劈后沿泥底劈向海底运移,如果流体没有运移到海底,就不会形成泥火山,而形成泥底辟。其次是流体沿断层或裂缝向上运移或渗漏到海底形成泥火山^[8]。

4 与油气的关系

大的含油气盆地(如准噶尔盆地、阿塞拜疆和墨西哥湾等)都发育有泥火山;利用泥火山寻找油气藏已有几十年的历史^[6,8]。全球有90%以上的泥火山喷出的气体来自地下油气藏。因此,泥火山可能与油气田有空间上和成因上的联系,是寻找油气和“渗漏型”天然气水合物的重要线索与示踪标志^[48~50]。



据文献[8]
From ref. [8]

图3 海底泥火山的两种基本形成机制示意图

Fig. 3 Picture showing submarine mud volcanoes formed by the two key mechanisms

如委内瑞拉和特立尼达的油田^[6]。据研究,泥火山喷出的气体是生物成因的甲烷,并含有大量的CO₂和N₂气体,表明它们源自地表浅层(深度不超过2 km);如果区内近期有火山活动,那么泥火山就不能作为深部油气藏的指示标志^[51]。

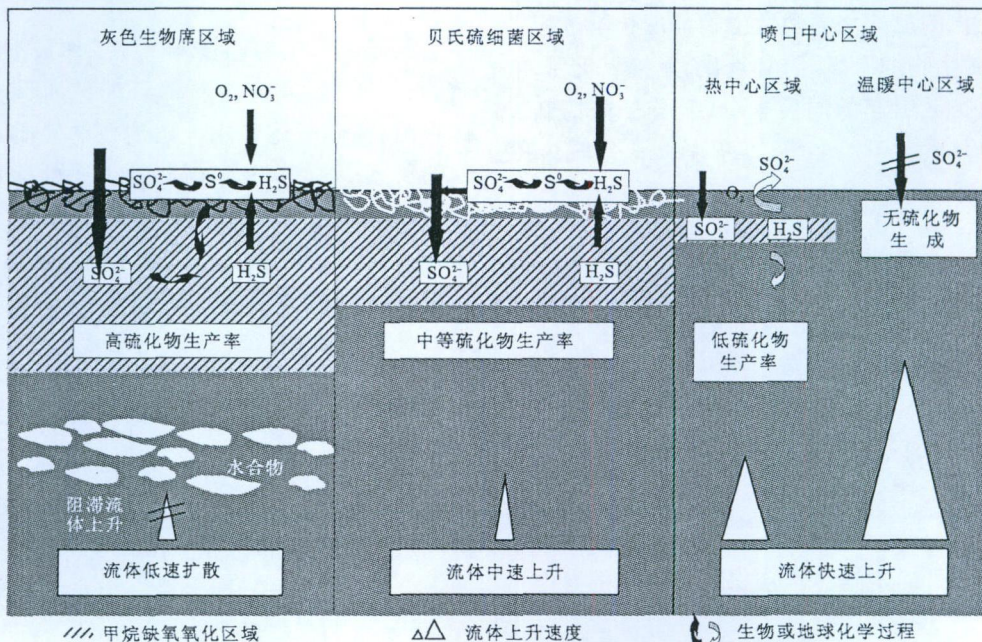
深水泥火山活动区的海底常发育有天然气水合物。里海、黑海、地中海、巴巴多斯海区、尼日利亚海域、加的斯湾、墨西哥湾海域和贝尔加湖都发现了泥

火山发育区的海底有天然气水合物^[15,53]。与泥火山相关的水合物的含量高,一般在沉积物中占1%~35%^[4]。

我国的泥火山基本上都与石油或天然气水合物有一定的关系。东海外陆架和冲绳海槽的海底泥火山就含有水合物^[31]。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^[34]。羌塘盆地泥火山的喷发物中含沥青脉,说明这里曾经发生过大规模的油气运聚活动,表明这个新生代沉积盆地有良好的油气前景^[25]。新疆独山子泥火山是独山子油田的遗址。1907年打下我国第一口石油钻井,百余年来一直在不停地向外渗漏泥浆和油气。可以说,泥火山是深部油气的指示器。

5 泥火山喷溢气体的微生物地球化学过程

巴伦支海海底泥火山地球化学过程和化能合成自生矿物的研究表明,不同位置的地球化学过程会因流体速率的变化而异^[19](图4)。在泥火山喷口的



据文献[19]
from ref. [19]

图4 Haakon Mosby 泥火山三个主要位置的最重要地球化学和微生物过程模式图

Fig. 4 Schema of the most important geochemical and microbiological processes in the three main locations of the Haakon Mosby Mud Volcano

中心区域, 流体快速上升和硫化物含量较高, 只有少量硫化物与 O_2 发生氧化还原反应或与流体中溶解铁离子反应生成少量 FeS 沉淀, 这些反应主要受微生物的甲烷氧化作用控制。在贝氏硫细菌(*Beggiatoa*)发育的区域, 流体上升速率和硫化物含量中等, 硫化物主要被微生物氧化。如果流体中有足够的氧气和硝酸盐, 贝氏硫细菌就会将硫化物完全氧化, 而硫化物化学反应或沉淀就变得无关紧要了。如果泥火山流体能提供充足的硝酸盐, 平均浓度达 110 mmol/L , 那么贝氏硫细菌就会将硫化物厌氧氧化生成硫酸盐($HS^- + NO_3^- + H^+ + H_2O \rightarrow NH_4^+ + SO_4^{2-}$ 和 $4HS^- + NO_3^- + 6H^+ \rightarrow 4S^0 + NH_4^+ + SO_4^{2-}$)。硫化物氧化过程中自然硫以中间产物出现($2S^0 + 3O_2 + 2H_2O \rightarrow 2SO_4^{2-} + H^+$)。在灰色生物席(mats)区域, 沉积物容易被生物扰动, 大量多样的硫酸盐被转化成硫化物, 由于扩散是物质交换的主要途径, 要有这样大量的硫化物生成, 在空间上要有水合物来限制上升流体。如果氧气和硫化物通量处于平衡状态, 那么微生物的氧化作用将控制消耗硫化物的地球化学过程。

地中海东北部阿姆斯特丹泥火山的研究表明, 泥火山口主要地球化学过程是微生物的甲烷厌氧氧化作用^[52]。有人认为引起泥火山气体分子浓度和同位素比值变化的地球化学和微生物地球化学过程主要有: 甲烷微生物的有氧/厌氧氧化、无机氧化(如硫化物氧化)、扩散引起的同位素分馏、分子分馏和石油生物降解与次生甲烷生成, 以及气体混合^[49]。

贝尔加湖泥火山区是全球唯一发现天然气水合物的淡水生态系统, 对研究微生物在淡水系统水合物形成和分解中的作用有着重要意义。它的泥火山沉积物研究显示, 孔隙水的化学成分在空间上有非常明显的变化。溶解盐的总浓度为 $0.1\% \sim 1.8\%$, 沉积物中甲烷的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 为 $-61.3\% \sim -72.9\%$, 硫酸盐还原率为 $0.001 \sim 0.7 \text{ nmol/cm}^3 \cdot \text{d}$, 自养型甲烷的生成速率为 $0.01 \sim 2.98 \text{ nmol/cm}^3 \cdot \text{d}$, 甲烷厌氧氧化率为 $0 \sim 2.98 \text{ nmol/cm}^3 \cdot \text{d}$ 。这些结果表明甲烷生成过程对贝加尔湖含水合物沉积物起主导作用^[22]。

6 泥火山的地质灾害

虽然多数泥火山的喷发强度不大, 不会对自然环境产生明显的破坏, 但有少数泥火山有极其强烈的喷发, 以及喷出的大量温室气体都对周围环境产生极大的破坏。泥火山是由相对未固结的沉积物组

成, 边坡因坡度较大而极不稳定, 容易发生滑坡等地质灾害。泥火山的喷发经常伴随着火焰, 如 1958 年里海的 Makarov 泥火山喷发出高达 500 m 的火焰, 烟雾飘散高达万米以上。有些泥火山喷发会释放出数百万立方米以上的气体和几十万 m^3 以上的固体物质, 喷发出来的泥浆可覆盖数千平方千米以上, 对周围城镇、村庄和建设是重大地质灾害^[1, 35, 53, 54]。2006 年 5 月印尼东爪哇泥火山爆发, 泥浆温度达 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 甚至更高, 喷发最大速率达 $180\,000 \text{ m}^3/\text{d}$, 到 2008 年 6 月泥火山喷出的泥浆已经覆盖了大约 7.8 km^2 的地区, 堆积的泥浆厚度大约 20 m , 造成当地 4 万多人逃离家园, 所幸的是大量泥浆流入附近的波龙河才没有造成更大的灾害^[30, 43, 54]。此外, 泥火山释放出大量的甲烷和其他温室气体, 对全球气候产生重要影响^[12, 29, 39, 55]。如果在泥火山范围内进行钻探, 可能造成深部高压泥浆使其上部盖层出现裂缝而出现大规模的喷发^[56]。目前, 虽然泥火山的喷发到底给周围地区或浅海航行有多大危害还不得而知, 但在大陆边缘泥火山活动可能很容易引发边坡失稳而造成海底基础设施的损害。因此, 对泥火山特别是那些周期性喷发的泥火山的了解和采取防治措施是必要的^[39]。

7 我国泥火山的研究历史与展望

我国泥火山的调查与研究工作最早是在陆地上做的。1946 年重庆进行的石油地质调查时有了首次报道: 简单阐述了泥火山的概念及其与石油天然气的关系^[27]。1995 年新疆独山子的泥火山发生规模不小的喷发, 有过对喷发特征及其与地震关系的研究, 认为它与地震有一定的成因联系^[3, 23]。此后又有可可西里地区玛璋错钦湖畔苟纠麦尔沟泥火山成因机理研究^[26]、新疆独山子泥火山分布特征研究^[24]、羌塘盆地中部泥火山与大规模的油气运移的关系研究^[25], 以及独山子油气运移对泥火山喷发物的矿物和化学成分的影响研究^[57]等等。

海洋中的泥火山研究始于近年对海洋油气和天然气水合物调查和研究工作。探讨了泥火山构造中的水合物成矿模式, 指出泥火山是水合物的标志之一, 是寻找水合物的标志^[48]; 介绍了泥火山的全球分布特征和海底泥火山的成因与机制, 估计全球泥火山中水合物的甲烷总量为 $10^{10} \sim 10^{12} \text{ m}^3$ ^[14]; 分析了泥火山是油气勘探的重要标志^[15]; 通过泥火山发育特点及其伴生的天然气地球化学特征的分析, 指出某些泥火山伴生有烃类天然气(以成熟高熟煤型烃类气为主)的成因类型^[34]; 指出泥底辟与泥火

山在成因机制、发育演化特征、地质形态和存在形式方面的异同点,以及南海西北部莺歌海盆地泥底辟与东北部台西南盆地泥火山的展布特点及其伴生天然气的地球化学特征^[50]。

台湾地区的泥火山研究较多,对泥火山的分布特征、形成机理和生物地球化学方面都有较为深入的研究^[58~60]。

总而言之,相对国际上的泥火山研究集中于原位观测、甲烷的释放和生物地球化学过程^[10,13,22,61~63]的主流而言,我国对泥火山的研究比国外大约滞后150多年,最近有关泥火山的研究也多以报道性为主;无论是文献数量还是研究程度,都与国外有极大的差距。

今后的研究可能集中于如下几个方面:

(1) 泥火山的成因机制虽然还有许多争论,但具较快的沉积速率和活动大陆边缘的横向构造挤压作用是其关键因素。泥火山与油气田可能有空间和成因上的联系,可以作为寻找石油天然气及“渗漏型”天然气水合物的重要标志。泥火山释放的大量的甲烷和其他温室气体将对全球气候产生重要影响,可以通过周期性喷发的泥火山研究探讨全球气候变化。

(2) 泥火山口的中心位置有微生物甲烷的厌氧氧化和微生物有氧氧化两种氧化过程,泥火山口不同位置的地球化学过程会因流体速率的变化而发生变异。此外,地球化学和微生物化学过程会引起泥火山气体分子浓度和同位素比值的变化。

(3) 泥火山每年释放到大气中甲烷的量、泥火山释放甲烷的生物地球化学过程及其微生物作用,以及原位观测和生物地球化学的研究。

参考文献 (References):

[1] Aliyev A A, Guliyev I S, Belov I S. Catalogue of recorded eruptions of mud volcanoes of Azerbaijan[M]. Baku: Nafta-Press, 2002.

[2] Dimitrov L I. Mud volcanoes—A significant source of atmospheric methane[J]. *Geo-Marine Letters*, 2003, 23(3-4): 155-161.

[3] 李猛,王道,李茂伟,戴晓敏. 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, Dai Xiaomin. A research on eruption characteristic of Dushanzis mud volcano in Xin Jiang [J]. *Inland Earthquake*, 1996, 10(4): 359-362. (in Chinese)

[4] Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates[J]. *Marin. Geology*, 2000, 167(1-2): 29-42.

[5] Huguen C, Mascle J, Woodside J, Zitter T, Feucher J P. Mud

volcanoes and mud domes of the Central Mediterranean Ridge: Near bottom and in situ observations[J]. *Deep Sea Res. Part I: Oceanographic Research Papers*, 2005, 52(10): 1911-1931.

[6] Sun C H, Chang S C, Kuo C L, Wu J C, Shao P H, Oung J N. Origins of Taiwan's mud volcanoes: Evidence from geochemistry[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 2010, 37(2): 105-116.

[7] 陈淦. 关于泥火山的一些说法[J]. *石油知识*. 2000, (2): 15.
Chen Gan. Some statements about the mud volcano[J]. *Petrol. Know.*, 2000, (2): 15. (in Chinese)

[8] 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[C]. *Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity*, 2005, 51: 29-34.

[9] Milkov A V, Etiopie G. Global methane emission through mud volcanoes and its past and present impact on the Earth's climate—a comment[J]. *Inter. J. Earth Sci.*, 2005, 94(3): 490-492.

[10] Etiopie G, Feyzullayev A, Baciu C L. Terrestrial methane seeps and mud volcanoes: A global perspective of gas origin [J]. *Mar. Petrol. Geol.*, 2009, 26(3): 333-344.

[11] Medialdea T, Somoza L, Pinheiro L M, Fernandez-Puga M C, Vazquez J T, Leon R, Ivanov M K, Magalhaes V, Diazdel R V, Vegas R. Tectonics and mud volcano development in the Gulf of Cádiz[J]. *Mar. Geol.*, 2009, 261(1-4): 48-63.

[12] Dimitrov L I. Mud volcanoes—the most important pathway for degassing deeply buried sediments[J]. *Earth-Sci. Rev.*, 2002, 59(1-4): 49-76.

[13] Milkov A V, Sassen R. Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces[J]. *Mar. Petr. Geol.*, 2002, 19(1): 1-11.

[14] 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, (12): 20-23.
Liang Jie, Gong Jianming, Chen Jianwen. Mud volcanoes and gas hydrates[J]. *Mar. Geol. Letter*, 2006, (12): 20-23. (in Chinese)

[15] 范卫平, 郑雷清, 龚建华, 刘玉香. 泥火山的形成及其与油气的关系[J]. *吐哈油气*, 2007, (1): 43-47.
Fan Weiping, Zheng Leiqing, Gong Jianhua, Liu Yuxiang. Forming of mud volcano and relation with hydrocarbon [J]. *Tuha Oil and Gas*, 2007, (1): 43-47. (in Chinese with English abstract)

[16] Kopf A J. Significance of mud volcanism[J]. *Rev. Geoph.*, 2002, 40(2): 1-52.

[17] Feyzullayev A A, Movsumova U A. The nature of the isotopically heavy carbon of carbon dioxide and bicarbonates in the waters of mud volcanoes in Azerbaijan[J]. *Geoch. Inter.*, 2010, 48(5): 517-522.

[18] Kopf A, Stegmann S, Delisle G, Panahi B, Aliyev C S, Guliyev I. In situ cone penetration tests at the active Dashgil mud volcano, Azerbaijan: Evidence for excess fluid pressure, updoming, and possible future violent eruption[C]. *Mar. Petr. Geol.*, 2009, 26(9): 1716-1723.

- [19] Lichtschlag A, Felden J, Bruchert V, Boetius A, Beer D D. Geochemical processes and chemosynthetic primary production in different thiotrophic mats of the Hakon Mosby Mud Volcano (Barents Sea) [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 2010, 55 (2): 931—949.
- [20] Wallmann K, Drews M, Aloisi G, Bohrmann G. Methane discharge into the Black Sea and the global ocean via fluid flow through submarine mud volcanoes [J]. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 2006, 248 (1—2): 545—560.
- [21] Lykousis V, Alexandri S, Woodside J, Lange G, Dählmann A, Perissoratis C, Heeschen K, Ioakim C, Sakellariou D, Nomikou P, Rousakis G, Casas D, Ballas D, Ercilla G. Mud volcanoes and gas hydrates in the Anaximander mountains (Eastern Mediterranean Sea) [J]. *Mar. Petr. Geol.*, 2009, 26 (6): 854—872.
- [22] Zemskaya T I, Pogodaeva T V, Shubenkova O V, Chernitsina S M, Dagurova O P, Buryukhaev S P, Nam Saraev B B, Khlystov O M, Egorov A V, Krylov A A, Kalmychkov G V. 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]. *Geol. Mar. Lett.*, 2010, 30 (3—4): 411—425.
- [23] 王道, 李茂伟, 李锰, 戴晓敏. 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 Meng, Dai Xiaomin. A preliminary study on eruption of the mud volcano in Dushanzi, Xin Jiang [J]. *Seismol. Geol.*, 1997, 19 (1): 14—16. (in Chinese with English abstract)
- [24] Fu B H, Zheng G D, Nimomiya Y, Wang C Y, Sun G Q. Mapping hydrocarbon-induced mineralogical alteration in the northern Tian Shan using ASTER multispectral data [J]. *Terra Nova*, 2007, 19 (4): 225—231.
- [25] 解超明, 李才, 李林庆, 吴彦旺, 胡培远. 藏北羌塘中部首次发现泥火山 [J]. *地质通报*, 2009, (9): 1319—1324.
Xie Chaoming, Li Cai, Li Linqing, Wu Yanwang, Hu Peiyuan. First discovery of mud volcanoes in central Qiangtang, northern Tibet, China [J]. *Geol. Bull.*, 2009, (9): 1319—1324. (in Chinese with English abstract)
- [26] 胡东生, 张华京. 青藏高原可可西里地区玛章错湖畔苟纠麦尔沟的泥火山机理刍议 [J]. *干旱区地理*, 1998, (3): 13—18.
Hu Dongsheng, Zhang Huajing. A preliminary study on the mud volcanic mechanism of Goujiu M Aiga in Kekexili region, Qinghai Xizang Plateau [J]. *Arid. Land. Geogr.*, 1998, (3): 13—18. (in Chinese with English abstract)
- [27] 陈秉范. 四川盆地式泥火山的发现 [J]. *地质论评*, 1946, Z1: 65—70
Chen Bingfan. Sichuan basin style mud volcanoes have been found [J]. *Geol. Rev.*, 1946, Z1: 65—70. (in Chinese with English abstract)
- [28] Hulme S M, Wheat C G, Fryer P, Mottl M J. Pore water chemistry of the Mariana serpentinite mud volcanoes: A window to the seismogenic zone [J]. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2010, 11 (1): 1—29.
- [29] Tinivella U, Accaino F, Della Vedova B. Gas hydrates and active mud volcanism on the South Shetland continental margin, Antarctic Peninsula [J]. *Geol. Mar. Lett.*, 2008, 28 (2): 97—106.
- [30] Mazzini A, Nermoen A, Krotkiewski M, Podladchikov Y, Planke S, Svensen H. Strike-slip faulting as a trigger mechanism for overpressure release through piercement structures. Implications for the Lusi mud volcano, Indonesia [J]. *Mar. Petro. Geol.*, 2009, 26 (9): 1751—1765.
- [31] Yin P, Berne S, Vagner P, Loubrieu B, Liu Z. Mud volcanoes at the shelf margin of the East China Sea [J]. *Marin. Geol.*, 2003, 194 (3—4): 135—149.
- [32] Chiu J K, Tseng W H, Liu C S. Distribution of gassy sediments and mud volcanoes offshore southwestern Taiwan [J]. *Terrest. Atmosphere, Oceanic Sci.*, 2006, 17 (4): 703—722.
- [33] You C F, Gieskes J M, Lee T, Yui T F, Chen H W. Geochemistry of mud volcano fluids in the Taiwan accretionary prism [J]. *Appl. Geochem.*, 2004, 19 (5): 695—707.
- [34] 陈胜红, 贺振华, 何家雄, 朱明, 陈雪芳, 庞雄, 翁荣南, 崔莎莎, 姜建. 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, (6): 872—878.
Chen Shenghong, He Zhenhua, He Jiexiong, Zhu Ming, Chen Xuefang, Pang Xiong, Weng Rongnan, Cui Shasha, Jiang Jian. 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]. *Nature Gas Geosci.*, 2009, (6): 872—878. (in Chinese with English abstract)
- [35] Gerchberg R W. Peculiarities in the Manifestation of Gaseous Mud Volcanoes [J]. *Nature*, 1972, 240: 406—408.
- [36] Kopf A J. Volcanoes: making calderas from mud [J]. *Nature Geosci.*, 2008: 500—501.
- [37] Mazzini A, Svensen H, Akhmanov G G, Aloisi G, Planke S, Malthes S A, Istadi B. Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007, 261: 375—388.
- [38] Manga M, Brumm M, Rudolph M L. Earthquake triggering of mud volcanoes [J]. *Mar. Petr. Geol.*, 2009, 26 (9): 1785—1798.
- [39] Deville E, Guerlais S H. Cyclic activity of mud volcanoes: Evidences from Trinidad (SE Caribbean) [J]. *Mar. Petr. Geol.*, 2009, 26 (9): 1681—1691.
- [40] Graue K. Mud volcanoes in deepwater Nigeria [J]. *Mar. Petr. Geol.*, 2000, 17 (8): 959—974.
- [41] Etiope G, Milkov A V. A new estimate of global methane flux from onshore and shallow submarine mud volcanoes to the atmosphere [J]. *Environ. Geol.*, 2004, 46 (8): 997—1002.
- [42] Zoprowski A, Miller S A. Modelling eruption cycles and decay of mud volcanoes [J]. *Mar. Petr. Geol.*, 2009, 26 (9):

- 1879—1887.
- [43] Istadi B P, Pramono G H, Sumintadireja P, Alam S. Modeling study of growth and potential geohazard for LUSI mud volcano: East Java, Indonesia[J]. *Mar. Petr. Geol.*, 2009, 26(9): 1724—1739.
- [44] Baciú C, Etiope G. Mud volcanoes and seismicity in Romania [M]. *Mud Volcanoes, Geodynam. Sci.*, 2005, 51: 77—87.
- [45] Delisle G, Von R U, Andruleit H, Daniels C H, Tabrez A R, Inam A. Active mud volcanoes on- and offshore eastern Makran, Pakistan[J]. *Inter. J. Earth Sci.*, 2002, 91(1): 93—110.
- [46] Mellors R, Kilb D, Aliyev A, Gasanov A, Yetirmishli G. Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions[J]. *J. Geoph. Res.—Solid Earth*, 2007, 112(B4): 1—11.
- [47] Skinner J A, Mazzini A. Martian mud volcanism: Terrestrial analogs and implications for formational scenarios[J]. *Mar. Petr. Geol.*, 2009, 26(9): 1866—1878.
- [48] 沙志彬, 张光学, 梁金强, 王宏斌. 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, Wang Hongbin. Mud volcano — One live evidence of the existence of gas hydrates[J]. *Geol. Res. South China Sea*, 2005, (1): 48—56. (in Chinese with English abstract)
- [49] Etiope G, Feyzullayev A, Milkov A V, Waseda A, Mizobe K, Sun C H. Evidence of subsurface anaerobic biodegradation of hydrocarbons and potential secondary methanogenesis in terrestrial mud volcanoes[J]. *Mar. Petr. Geol.*, 2009, 26(9): 1692—1703.
- [50] 何家雄, 祝有海, 翁荣南, 崔莎莎. 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 Jiexiong, Zhu Youhai, Weng Rongnan, Cui Shasha. 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—J. China Univ. Geosci.*, 2010, 35(1): 75—86. (in Chinese with English abstract)
- [51] Milkov A V, Sassen R, Apanasovich T V, Dadashev F G. 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—1040.
- [52] Pape T, Kasten S, Zabe M, Bahr A, Abegg F, Hohnberg H J, Bohrmann G. Gas hydrates in shallow deposits of the Amsterdam mud volcano, Anaximander mountains, northeastern Mediterranean Sea[J]. *Geo-Marine Lett.*, 2010, 30(3—4): 187—206.
- [53] Cyranoski D. Volcano gets choke chains to slow mud[J]. *Nature*. 2007, 445: 470—470.
- [54] Normile D. Two years on, a mud volcano still rages—and bewilders[J]. *Sci.*, 2008, 320: 1406—1407.
- [55] Kopf A J. Global methane emission through mud volcanoes and its past and present impact on the Earth's climate[J]. *Inter. J. Earth Sci.*, 2003, 92(5): 806—816.
- [56] Davies R J, Swarbrick R E, Evans R J, Huuse M. Birth of a mud volcano: East Java, 29 May 2006 [J]. *GSA Today*, 2007, 17(2): 4—9.
- [57] Zheng G D, Fu B H, Takahashi Y, Kuno A, Matsuo M, Zhang J D. Chemical speciation of redox sensitive elements during hydrocarbon leaching in the Junggar Basin, northwest China [J]. *J. Asian Earth Sci.*, 2010, 39(6): 713—723.
- [58] Sung Q C, Chang H C, Liu H C, Chen Y C. Mud volcanoes along the Chishan fault in southwestern Taiwan: A release bend model[J]. *Geomorph.*, 2010, 118(1—2): 188—198.
- [59] Sun C H, Chang S C, Kuo C L, Wu J C, Shao P H, Oung J N. Origins of Taiwan's mud volcanoes: Evidence from geochemistry[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 2010, 37(2): 105—116.
- [60] Hung C C, Chen F Y, Sun C H. Gases in Taiwan mud volcanoes: Chemical composition, methane carbon isotopes, and gas fluxes[J]. *Applied Geochem.*, 2010, 25(3): 428—436.
- [61] Lichtschlag A, Felden J, Wenzhofer F, Schubotz F, Ertefai T F, Boetius A, de Beer D. Methane and sulfide fluxes in permanent anoxia: In situ studies at the Dvurechenskii mud volcano (Sorokin Trough, Black Sea) [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2010, 74(17): 5002—5018.
- [62] Lichtschlag A, Felden J, Bruchert V, Boetius A, de Beer D. Geochemical processes and chemosynthetic primary production in different thiotrophic mats of the Hakon Mosby Mud Volcano (Barents Sea) [J]. *Limnol. Oceanog.*, 2010, 55(2): 931—949.
- [63] Kopf A, Delisle G, Faber E, Panahi B, Aliyev C S, Guliyev I. Long-term in situ monitoring at Dashgil mud volcano, Azerbaijan: a link between seismicity, pore-pressure transients and methane emission[J]. *Inter. J. Earth Sci.*, 2010, 99: S227—S240.