

泥底辟输导流体机制及其与天然气水合物成藏的关系

刘杰^{1,2}, 孙美静³, 杨睿^{1,2}, 苏明^{1,2}, 严恒⁴

(1. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东广州 510640;

2. 中国科学院天然气水合物重点实验室, 中国科学院广州能源研究所, 广东广州 510640;

3. 广州海洋地质调查局, 广东广州 510760; 4. 中海石油有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057)

摘要: 详细阐述不同成因的泥底辟流体输导模式, 探讨了泥底辟输导体系的演化与天然气水合物成藏之间的关系, 并分析神狐海域泥底辟输导体系对天然气水合物成藏的影响。底辟核外部伴生断裂、底辟核内部流体压裂裂缝和边缘裂缝带均可作为输导流体的通道。根据运移通道和动力等差异性, 提出泥底辟输导流体的2种端元模式: 超压-流体压裂输导型和边缘构造裂缝输导型。在此基础上, 讨论了泥底辟(泥火山)的不同演化阶段对水合物的形成、富集和分解的影响。早期阶段, 泥底辟形成的运移通道可能未延伸到水合物稳定带, 导致气源供给不够充分; 中期阶段, 水合物成藏条件匹配良好, 利于天然气水合物生成; 晚期阶段, 泥火山喷发引起水合物稳定带的热异常, 可能导致水合物分解, 直至泥火山活动平静期, 水合物再次成藏。神狐海域内泥底辟分为花冠状和穹顶状两类, 花冠状泥底辟以超压-流体压裂输导型为主; 穹顶状泥底辟以底辟边缘裂缝输导型为主。泥底辟输导体系的差异性可能是神狐海域天然气水合物非均质分布的影响因素之一。

关键词: 泥底辟; 输导体系; 天然气水合物; 成藏机制; 神狐海域

中图分类号: P618.1; TE132.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2016)06-1399-09

Diapir Conduit Fluid Mechanism and Its Relationship with Gas Hydrate Accumulations

LIU Jie^{1,2}, SUN Meijing³, YANG Rui^{1,2}, SU Ming^{1,2}, YAN Heng⁴

(1. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 2. Key Laboratory of Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

3. Key laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou, Guangdong 510750, China; 4. Zhanjiang Division of CNOOC Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524057, China)

Abstract: This paper describes fluid migration patterns about mud diapir with different origins, then discusses the relationship between natural gas hydrate accumulation and the evolution of mud diapir migration system, and analyzes the effect of mud diapir migration system on gas hydrate accumulation in Shenhu area. The fluid migration systems for diapir consist of external associated fault and fracture, the internal overpressured fluid fracture and structural fracture in the margin of diapir. Depending on migration conduit and migration dynamics, two kinds of fluid migration patterns have been proposed: overpressure-conducting fracturing fluid migration type and marginal fracture migration type. In addition, the mud diapir (mud volcano) has different effects on formation

收稿日期: 2016-04-16; **改回日期:** 2016-10-14; **责任编辑:** 潘令枝。

基金项目: 中国科学院可再生能源重点实验室基金项目(y507j61001); 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); 中国石油-中国科学院科技合作项目(2015A-4813)。

作者简介: 刘杰, 男, 助理研究员, 1986年出生, 矿产普查与勘探专业, 主要从事天然气水合物成藏机制研究工作。

Email: liujie1@ms.giec.ac.cn.

通信作者: 杨睿, 男, 助理研究员, 1980年出生, 海洋地质专业, 主要从事天然气水合物地球物理方面的研究。

Email: yangrui@ms.giec.ac.cn.

and stability of the hydrate in the different evolution stages. The migration channel may not extend to the hydrate stability zone in the early stages of mud diapiric formation, which results in insufficient supply of CH_4 . It is conducive to the formation of natural gas hydrates in the middle stage, because of good matching in hydrate metallogenic conditions; the abnormal heat in the hydrate stability zone, caused by high temperature gas-bearing fluid from mud volcano eruption, may lead to the decomposition of hydrates in the late stage. Until the quiet period of mud volcano activity, hydrates can be reserved again. According to morphological characteristics of diapirs in Shenhu Area, mud diapirs could be classified into two types: corolliform and dome-form diapirs. The fluid migration pattern of corolliform diapirs belongs to overpressure-conducting fracturing fluid migration type; the fluid migration pattern of dome-form diapirs belongs to marginal fracture migration type. Different diapiric migration patterns may be one of main factors of non-homogeneous distribution of gas hydrate in Shenhu area.

Key words: mud diapir; fluid migration system; gas hydrate; reservoir mechanism; Shenhu area

0 引言

近年来国内外学者针对天然气水合物成藏理论开展了大量的工作,研究表明含气流体运移是天然气水合物成藏的重要组成部分^[1-8]。海域天然气水合物的勘探实例揭示海底泥底辟(泥火山)作为重要的流体输导体系,往往与水合物的形成和聚集表现出密切的关联。如里海、黑海、地中海、鄂霍次克海、巴巴多斯海区、尼日利亚海域、加的斯湾、墨西哥湾等泥底辟(泥火山)发育的地区,都发现了水合物存在的证据^[1-2]。这些地区与泥底辟(泥火山)相关的水合物具有许多共同特征,如水合物表现为白色或灰白色,产状以薄片状、片状、结核状集合体为主,通常赋存于海底沉积物或泥火山喷发的泥流层中,饱和度变化较大,在1%~35%之间,表现出较强的非均质分布的特点^[1]。目前对海底泥底辟(泥火山)与天然气水合物的非均质分布的关联性研究,主要集中在泥底辟(泥火山)的空间形态和含水合物层的空间匹配上^[3-8],对深部物质上涌导致上覆地层中温度、压力、气体组分等变化也展开了研究^[9-13]。但由于底辟发育区地震资料分辨率低、信噪比差等原因,泥底辟输导体系的内部结构和运移通道的研究一直受到制约。事实上,泥底辟活动具有周期性,泥底辟活动不同时期所受应力强度、流体压力、运移通道类型及运移动力等方面存在差异^[14-16]。泥底辟输导流体的机制、泥底辟输导效能的时空变化可能是控制泥底辟发育区天然气水合物非均质分布和动态成藏的关键因素之一。

因此,笔者在前人对泥底辟输导体系研究的基础上,详细阐述了不同成因的泥底辟流体输导

模式,并探讨了泥底辟不同演化阶段的流体输导机制及与天然气水合物成藏之间的关系,最后结合南海北部陆坡神狐海域实际地质地震资料,分析了神狐海域泥底辟输导体系对天然气水合物成藏的影响,旨在进一步完善泥底辟输导理论,并为天然气水合物成藏机制研究提供理论支持。

1 泥底辟输导体系的构成

泥底辟在地震剖面上常表现为直立的柱状,内部多为不连续、弱振幅的空白反射或杂乱反射。泥底辟输导体系的构成要素包括泥底辟核外的伴生断层、裂缝带和周缘展布的高渗透砂体及底辟核内部裂缝系统(图1)。泥底辟外部输导要素的垂向分布具有分异性,即深部运移通道以裂缝为主,浅部以底辟冠部和侧翼的伴生断裂为主。而泥底辟核内部裂缝系统的结构国内研究较少。BROWN等^[17]1993年根据露头、地震剖面 and 镜下分析等资料,认为美国塔霍拉地区的 Duck Creek 底辟具有三元结构,即由中心向外,根据其变形程度的不同可分为:内部相带、过渡相带和边缘相带。其中边缘相带发育高角度的裂缝,内部相带裂缝基本不发育。底辟核边缘相带形成高角度定向裂缝的原因可能是泥底辟在其向上侵入的过程中,上覆沉积载荷保持恒定或者逐渐增强,使得泥底辟经历应变硬化的结果。另外,大量的研究已经证实沉积盆地中泥底辟内部普遍存在异常高孔隙流体压力,泥底辟形成过程中不仅受到构造应力的作用,也常受到异常高流体压力(超压)的影响。例如,前人对莺歌海盆地泥底辟发育演化的研究表明,早期泥底辟的形成主要受区域构造应力场的影响,晚期受不均衡压实和热作用引

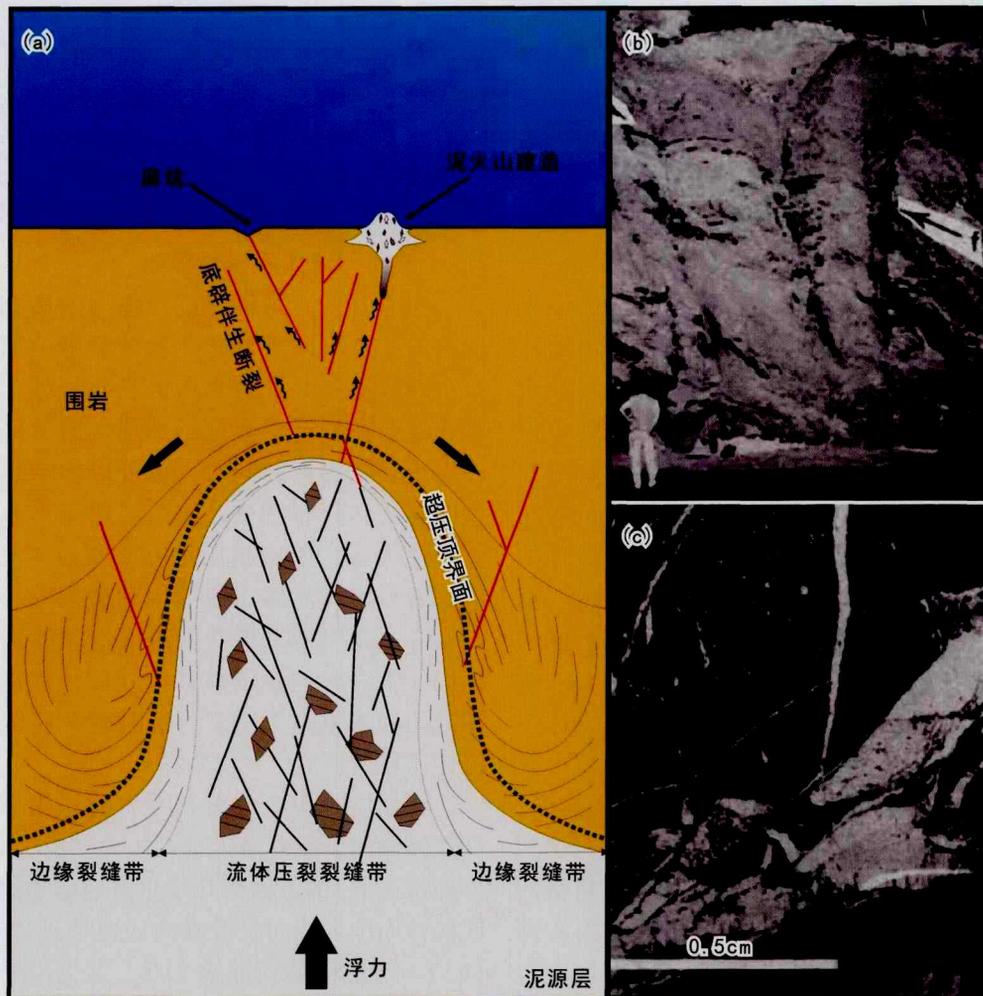


图1 构造应力和超压作用下的泥底辟输导体系构成要素示意图((b)和(c)露头显示 Duck Creek 泥底辟边缘的高角度断裂,图(b)和(c)据 BROWN 等^[21]修改)

Fig. 1 Schematic diagrams of diapor conduit system with the interactive effect of tectonic stress and overpressure((b) & (c) outcrops display high angle fracture in the margin of Duck Creek Diapor; modified after BROWN et al. ^[21])

导盆地超压体系的发育,形成流体底辟^[18]。在超压流体作用下,泥底辟核部可形成断裂或裂缝,即所谓的流体压裂(或称之为水力破裂)。因此,在泥底辟形成演化过程中,受构造应力和流体压力的“交互式”作用,泥底辟核内裂缝带可以形成二分结构,即底辟核中心流体压裂带和边缘裂缝带,边缘以底辟上隆过程中受构造应力场影响下的构造成因裂缝为主。在泥底辟形成演化的过程中,这些不同规模、不同成因的断裂和裂缝系统周期性地开启,成为来自深部烃源层的热解气向浅层运移的重要通道。超压控制下形成的泥底辟内部裂缝体系随着超压的释放-积聚而周期性地开启和闭合。

1.1 底辟外围伴生断裂

底辟外围伴生断裂是底辟穿刺过程中在内部

高能驱动和外部应力场的共同作用下引起周围地层和上覆地层破裂形成的。平面上这些断裂常呈放射状或环状,剖面上断裂比较平直,有时相互截切成“Y”字形。底辟外围伴生断裂的流体垂向输导效率主要受到断层的几何特征、组合关系、空间展布等因素的影响;泥底辟活动的不同阶段外围伴生断裂在几何特征、力学性质、组合关系和空间展布等方面存在差异性,如底辟活动早期,上覆地层常形成拱张型断裂或裂缝,而活动晚期,底辟内部应力得以释放,常形成呈现漏斗状的塌陷断裂或环状断裂。另外,与泥底辟直接接触的各层渗透层的产状、厚度、物性等也是影响泥底辟输导能力的另一个方面。

1.2 底辟边缘裂缝带

与砂岩侵入体不同,泥底辟的渗透率往往比

围岩的低,其本身不能为流体的运移提供通道。然而,在泥底辟向上侵入上覆地层的过程中,由于构造变形作用(如韧性剪切破裂),泥底辟与围岩的接触面附近,常发育近平行于泥底辟边缘的高角度剪切裂缝和张剪性裂缝形成的裂缝网络,称为鳞片状节理(*scaly fabrics*)^[17, 19-22](图1)。这种构造成因的裂缝增大了底辟核泥岩的渗透率,使得底辟边缘成为流体输导的高渗通道。巴巴多斯、墨西哥南部和危地马拉断裂带中识别出鳞片状节理,宽度在数米到数十米之间^[17];之后在帝汶岛、婆罗洲和日本等地的泥底辟中也发现了该构造^[19-22],但并非所有的泥底辟边缘都发育鳞片状节理,如意大利北部的摩德纳地区的 Nirano 泥底辟边缘并没有发现这种构造^[21]。鳞片状节理的形成受到应力-应变过程、泥底辟矿物组成、黏度等控制^[21-23]。底辟在上隆的过程中,还有侧向外扩张空间的趋势,从而产生向四壁围岩的侧向挤压,越接近底辟与围岩的接触带,挤压作用越强烈,裂缝越密集。在这种挤压作用下黏土矿物常垂直挤压力方向而平行于接触面呈定向排列;另外,野外露头可见鳞片状节理的节理面因受到剪切滑动形成的擦痕。实验表明这种裂缝网络的渗透率具有明显的方向性,即平行裂缝方向渗透率显著大于垂直裂缝方向渗透率^[23-24]。泥底辟边缘强烈各向异性的裂缝网络系统使其成为汇聚性流体输导体系,否则流体将倾向于由底辟核向围岩侧向/横向扩散。

1.3 流体压裂裂缝

除了构造成因的裂缝,底辟核内常发育流体压裂裂缝。流体压裂是由于地层超压导致流体压力超过上覆地层的抗张强度所致,流体压裂作用主要发育于泥底辟带的泥源层内。前人对莺歌海盆地中央底辟带地震反射特征、岩心观察、地球化学特征等的研究,提供了流体压裂及流体释放的大量证据^[25]。例如,泥底辟内如果发育密集的流体压裂裂缝,当含气流体向上运移时,底辟内便形成气烟囱,地震反射表现为模糊带。流体压裂形成的微破裂网络使得底辟核内低渗的泥岩的渗透率高于围岩,极大地提高了岩层的渗透性和输导流体的能力,这时整个泥底辟将成为流体运移通道。

2 泥底辟输导流体的模式

在构造应力、异常高流体压力(超压)或两者

共同作用下,泥底辟及流体运移呈周期性幕式活动。泥底辟发育的不同阶段或不同成因控制下的泥底辟,其流体输导机制如运移通道、运移动力等方面具有差异。根据流体机制的差异,提出泥底辟输导流体的2种模式:超压-流体压裂输导型和泥底辟边缘裂缝输导型(图2)。

2.1 超压-流体压裂输导型

在应力-流体压力耦合作用的影响下,泥底辟核内产生不同类型和产状的裂缝,如水力破裂水平缝或走向杂乱的水力破裂垂直缝。泥底辟内部普遍存在的超压降低了地层的有效应力,从而在促进裂缝发育的同时,也可以影响裂缝发育类型的转变和分布特征,如浅层超压水力破裂以垂直张性为主,深层超压水力破裂以剪切为主^[26]。低渗岩石中的流体压裂形成的微裂缝、连通孔隙及底辟边缘构造裂缝共同组成的裂缝网络极大地提高了底辟核的渗透性和输导流体的能力,使得泥岩的渗透率高于围岩,这时整个底辟核将成为流体运移通道。

在超压、构造应力和浮力的作用下,底辟内部流体倾向于沿着最大过剩压力梯度(流体压力减去静水压力)的方向或几乎垂直底辟边缘方向,由底辟核向围岩横向扩散和向底辟核顶部运移(图2(a))。泥底辟的顶部或上部,常见由于底辟过程中的顶蚀或者垮塌等作用形成的呈放射状或环状的正断层。这些断层也会为流体的向上运移提供通道。通过底辟核外部开启的断裂,底辟核内超压传递至浅层,底辟外渗透性地层和底辟核内低渗泥岩发生水动力连通,形成“他源超压”,增强了底辟外部输导流体的动力^[27]。当底辟内部过剩压力降低到与围岩一致时,快速流体运移过程才逐渐停止。这种输导模式由于泥底辟构造具有强大的超压驱动流体、充足的气体供应及良好的横向和垂向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、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。

2.2 底辟边缘裂缝输导型

超压释放后,泥底辟内压力达到平衡后,底辟核内部流体压裂裂缝闭合,流体沿泥底辟运移的能力减弱或终止。泥底辟热流体活动间歇期是否具有输导流体的能力,取决于泥底辟边缘是否形成裂缝网络。在恒定或者逐渐增强的有效应力的剪切作用下,泥底辟边缘可以形成自中心向边

缘逐渐增强的鳞片状节理。这样的条件可能发生在底辟经历净埋藏时, 如快速沉积作用造成上覆负载增厚^[20]。然而随着泥底辟持续向上侵入, 造成底辟的卸载, 有效应力最终会下降, 因此鳞片状节理一般形成于底辟侵入速率小于上覆沉积速率的早期底辟中。鳞片状节理成为泥底辟活动间歇期流体运移的优势通道, 使得流体沿着底辟边缘向上运移(图2(b))。这种输导模式与超压流体控制下的快速幕式运移相比, 泥底辟的横向输导能力较弱, 底辟内部的含气流体主要以垂向运移为主; 且由于运移动力主要为剩余压力和浮力, 底辟表现为缓慢的汇聚性渗流。在持续性的汇聚性渗流作用下, 泥底辟上方可能会形成麻坑、凹槽等微地形地貌。

3 泥底辟输导体系的演化与天然气水合物

近年来与泥底辟(泥火山)相关的海域天然气水合物的勘探实例揭示: 泥底辟(泥火山)的分布

与似海底反射(bottom simulating reflector, 简称BSR)的平面分布范围具有良好的空间匹配关系。一般而言, 泥底辟(泥火山)地区海底地形常起伏不平, BSR常发生错断、连续性较差, 且往往有水合物产出。但有水合物产出的泥底辟(泥火山)发育区未必就有BSR。如黑海的Dvurechenskii、Yaltu、Odessu等泥火山取出的样品普遍发现水合物, 但地震剖面上都没有BSR显示^[28]。

海底泥底辟(泥火山)与BSR之间存在3种空间关系: (1)BSR位于泥底辟之上或两翼部^[29]; (2)BSR位于泥底辟与泥火山之间^[30], 如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; (3)BSR位于泥火山喷发物形成的泥质碎屑流中, 如LYKOUSIS等2009年在研究地中海的Amsterdam泥火山与水合物的关系时, 发现BSR位于海底以下50ms(地震波走时)的泥火山喷发的泥质碎屑流中^[31]。

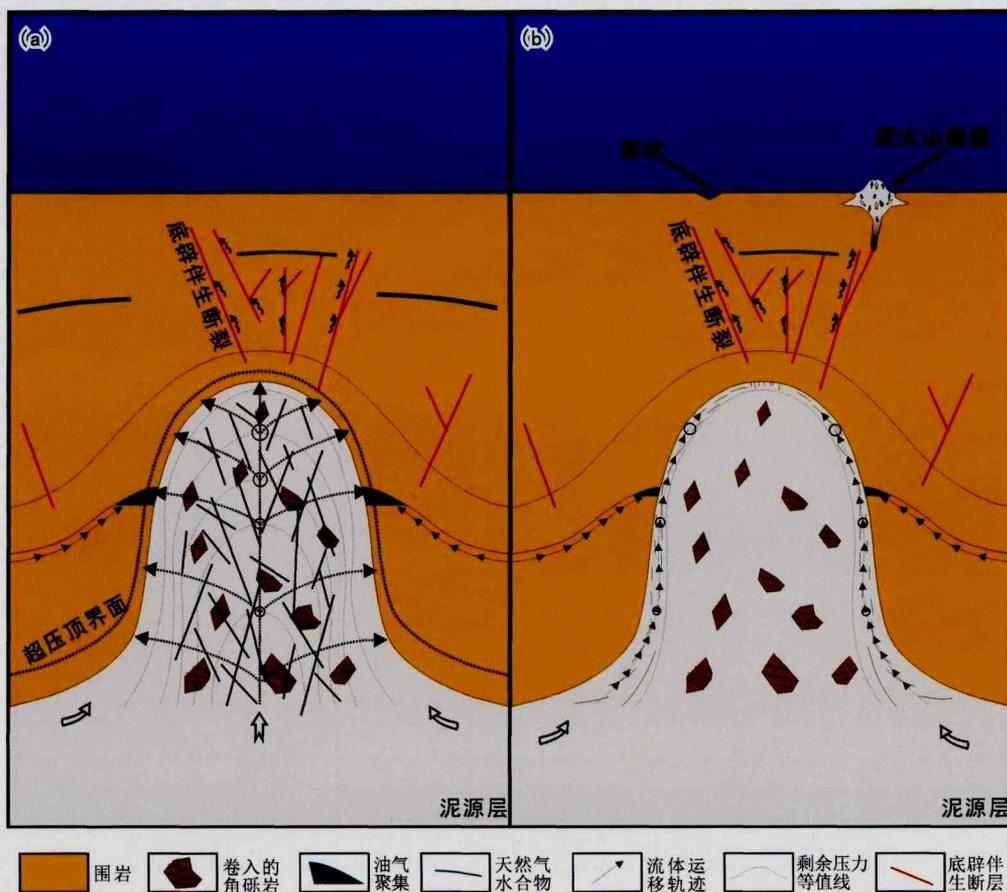


图2 泥底辟输导体系输导流体的2种端元模式((a)超压-流体压裂输导型; (b)底辟边缘裂缝输导型)

Fig. 2 Two kinds of fluid migration end-member patterns for diapir((a) overpressure-conducting fracturing fluid migration type; (b) marginal fracture migration type)

泥底辟形成过程可以分为3个阶段：隐刺穿阶段、刺穿阶段和强刺穿-喷发阶段，最后一个阶段也被视为泥火山的发育阶段。不同阶段，泥底辟内流体压力和经历的应力-应变过程不同，导致泥底辟内裂缝类型和产状等特征不断演化，从而影响泥底辟的输导能力。通过以上泥底辟与BSR空间关系的案例，综合泥底辟对温度场、含气流体的运移等天然气水合物成藏要素的影响，提出如下泥底辟输导体系的形成演化与水合物动态成藏的关系模式^[32]。

3.1 早期阶段——隐刺穿阶段

底辟活动初期，底辟物质液化程度弱、黏度大、塑性差且变形较弱。在密度反转产生的浮力、构造挤压作用或不均衡压实作用下，泥岩变形并上拱，形成与上覆围岩呈“整合”关系的低幅背斜形态，称为龟背型底辟体(图3(a))。该阶段底辟上拱较慢，小于上覆沉积速率，底辟经历净埋藏。这使得底辟经历恒定或者逐渐增强的有效应力的剪切作用，因此泥底辟边缘可以形成一定宽度的鳞片状节理。该阶段泥底辟对周围地层的地

温场分布影响较小，同时，由于拱起幅度小，底辟核上部裂隙通道不太发育，气体运移效率低，仅有少量深部流体以底辟边缘裂缝输导模式向上运移至水合物稳定域内，不利于水合物的富集成藏。

3.2 中期阶段——刺穿阶段

早期泥底辟形成的背斜形态及泥源层内逐渐增强的热流体活动，有利于龟背核部的流体压力进一步增大。当流体压力超过盖层所能承受的压力，盖层将发生破裂，此时将形成穿刺型泥底辟。该阶段对水合物的形成是非常有利的：(1)底辟核外断裂和核内流体压裂裂缝等为气体运移至水合物稳定域内部提供了通道；(2)泥底辟侵入造成侧翼或顶部的沉积层倾斜和变形可改变局部水动力条件，便于流体排放^[33]。

该阶段流体以超压-流体压裂输导型模式向上运移至天然气水合物稳定带成藏。水合物的形成将会起到封盖下部游离气的作用，这时气体上移速率明显减弱，同时发生侧向运移，当气体在BSRs下部聚集导致气体压力增大到一定程度时，

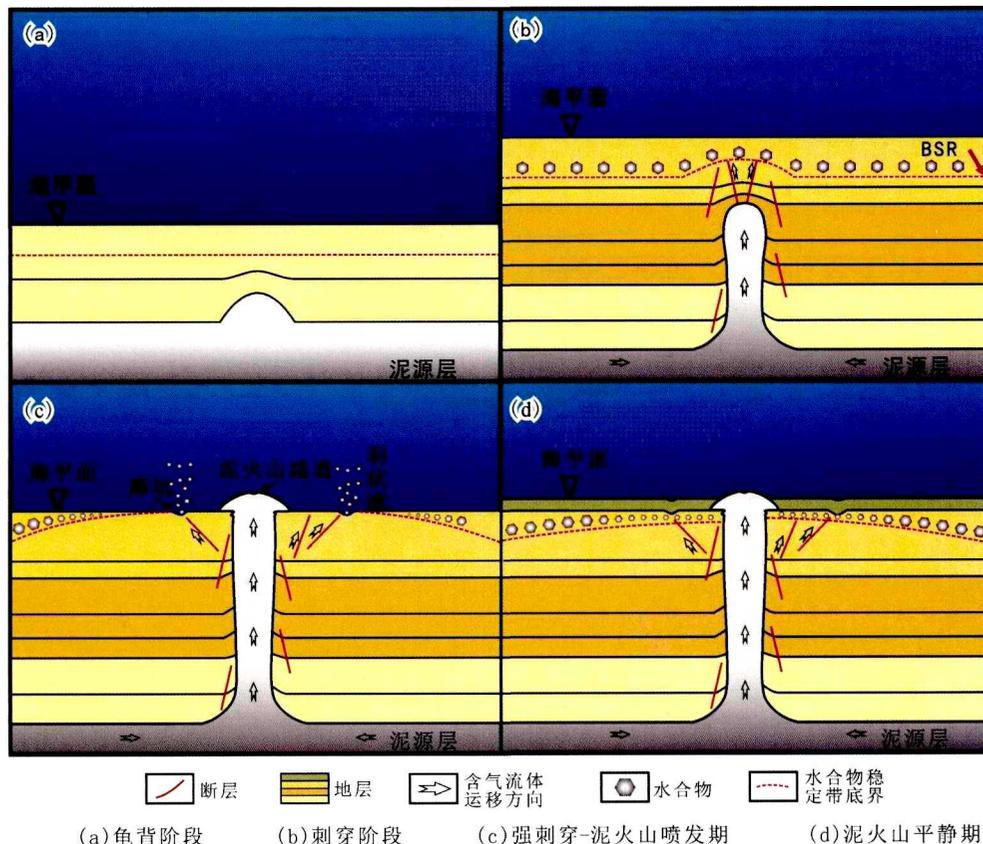


图3 泥底辟的形成与天然气水合物动态成藏关系模式(据刘杰等^[35]修改)

Fig. 3 Formation of mud volcano and gas hydrate mineralization(modified after LIU et al. ^[35])

便会突破水合物层,形成裂缝,发生再次向上的运移(图3(b))。

3.3 晚期阶段——强刺穿-喷发阶段(泥火山发育阶段)

晚期泥底辟强烈刺穿围岩或地层,并上侵到水合物稳定域内。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便会从流体中析出,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^[20],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下,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和凹槽,水体中形成羽状气泡流。泥火山、麻坑、凹槽等微地形地貌的发育特征可以反映流体渗漏强度或底辟输导能力的差异。

泥火山的周期活动可分为短时间的间隔喷发期和长时间的平静期:(1)喷发期,泥火山深部热流体迅速向上运移,大量热液物质的流动与交换可以在短时间内引起附近地层中温度场的变化,造成热流异常,水合物矿藏将会被破坏,甲烷气体进入海水形成甲烷羽状流(图3);(2)平静期,底辟核内部裂缝封闭,流体运移不活跃,以热传

导为主影响周缘地层的温度场,甚至会引起泥底辟上部温度场剖面下凹^[34]。随着泥火山喷发引起的热对流减弱和甲烷自下而上持续地运移到水合物稳定带内,水合物厚度逐渐恢复,且常呈环带状分布在底辟构造周围的沉积物或泥流层中(图3)。泥火山的周期性喷发会对已形成的水合物矿藏产生不同程度的改造,使得水合物矿藏处于动态演化的状态。

4 神狐海域泥底辟与水合物成藏

泥底辟在珠江口盆地白云凹陷内十分发育。在地震剖面上表现为与围岩呈明显的不整合接触的直立柱状,根部可追溯至文昌组和恩平组的主力巨厚烃源岩层,即源于深部的超压泥源层^[35]。底辟两侧可见断续的强振幅反射和同相轴下拉现象,这可能是气体充注造成的低速异常而导致的。泥底辟之上地层常具有明显的上拱或弱刺穿特征,底辟核往往与断层(或裂隙)相连,其上的海底有可能存在麻坑的现象。神狐海域泥底辟的内部反射特征多为不连续、弱振幅的空白反射或杂乱反射,由下自上可以划分为杂乱反射带、模糊反射带和顶部强振幅区域(图4)。内部反射特征垂向上变化的原因可能是由于:(1)泥底辟核自下向上压力逐渐降低,导致游离态的甲烷含量在垂向上

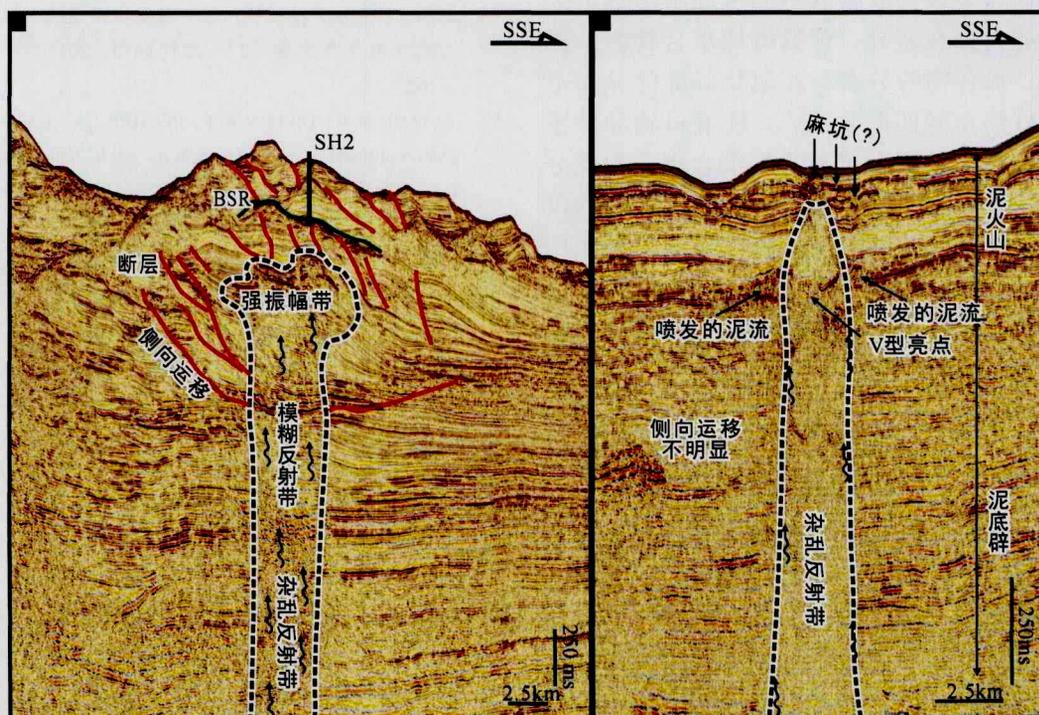


图4 神狐海域不同类型泥底辟地震反射剖面特征

Fig. 4 Seismic reflection profiles of different types of diapirs in Shenhu area

有差异；(2)泥底辟在向上侵入的过程中会卷入两侧围岩，围岩在垂向上的岩性变化，使得底辟核不同深度充填的粗粒碎屑角砾含量不同。(3)底辟核不同深度受到的孔隙压力、构造应力不同，导致裂缝发育程度和性质等不同。

根据泥底辟冠部形态特征，可以划分为花冠状和穹顶状两大类(图4)^[6]。冠部特征的不同，可能暗示了底辟演化程度不同。花冠状冠部表明泥底辟经历了晚期脱气脱水阶段，是含气流体大量释放的产物。其成因可解释为泥底辟侵入晚期，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，使得泥底辟顶部体积发生膨胀，呈囊状、花冠状横向扩张。花冠状泥底辟内部垂向上结构分异性明显，由下自上可以划分为杂乱反射带、模糊反射带和顶部强振幅区域(图4(a))^[36]。这类底辟核部中心部位以密集分布的水力破裂微裂缝为主，向上水力破裂强度逐渐减弱，到浅层流体垂向输导主要通过底辟伴生断裂。另外，泥底辟核外断层发育，侧向运移明显。穹顶状泥底辟垂向上不具备分异性，底辟内部和外部地震反射亮点不如花冠状底辟发育。如位于LW3-1井区的穹顶状泥底辟内部呈现杂乱反射，仅在底辟边缘出现亮点(图4(b))。通过对比研究发现，泥底辟在外部形态、内部反射特征和输导要素构成上的不同可能暗示这两类底辟输导能力存在差异。神狐海域水合物的钻探结果表明，水合物的分布与花冠状底辟的分布范围具有良好的空间匹配关系^[6]。泥底辟输导体系的差异性可能是神狐海域天然气水合物非均质分布的影响因素之一。花冠状泥底辟其底辟核内以流体压裂裂缝为优势输导通道，以超压-流体压裂输导型运移机制为主；穹顶状泥底辟输导能力较弱，通道为底辟核边缘裂缝带，遵循浮力控制下的缓慢渗流机制。

5 结论

(1)泥底辟核内裂缝带可以形成二分结构，即底辟核中心流体压裂带和边缘裂缝带。泥底辟输导流体的机制有2种模式：超压-流体压裂输导型和泥底辟边缘裂缝输导型。前者以流体压裂裂缝为泥底辟核部的优势输导通道，超压提供流体运移的动力；后者以底辟核边缘裂缝为输导通道，遵循浮力控制下的缓慢渗流机制。

(2)异常流体压力与构造应力共同控制了泥底

辟输导体系的形成和演化，并造成泥底辟输导能力的差异，进而影响了水合物的形成和赋存。中期刺穿阶段，水合物形成的各条件匹配良好，利于水合物的形成和稳定成藏；泥底辟不同演化阶段的差异，导致水合物处于“稳定-分解-再次稳定”的动态成藏过程之中。

(3)根据泥底辟冠部形态特征，可将神狐海域内泥底辟划分为花冠状和穹顶状两大类。花冠状泥底辟，以超压-流体压裂输导型运移机制为主；穹顶状泥底辟以底辟边缘裂缝输导为主。泥底辟输导体系的差异性可能是神狐海域天然气水合物非均质分布的影响因素之一。两种不同类型的泥底辟输导机制的发现对水合物成藏研究及勘探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] TREHU A, RUPPEL C, HOLLAND M, et al. Gas hydrate in marine sediments: lessons from Scientific Ocean Drilling [J]. *Oceanography*, 2006, 19(4): 124-143.
- [3] SATYAVANI N, THAKUR N K, ARAVIND K N, et al. Migration of methane at the diapiric structure of the western continental margin of India — insights from seismic data [J]. *Marine Geology*, 2005, 219(1): 19-25.
- [4] 苏明, 沙志彬, 匡增桂, 等. 海底峡谷侵蚀-沉积作用与天然气水合物成藏 [J]. *现代地质*, 2015, 29(1): 155-162.
- [5] TAYLOR M H, DILLON W P, PECHER I A. Trapping and migration of methane associated with the gas hydrate stability zone at the Blake Ridge Diapir: new insights from seismic data [J]. *Marine Geology*, 2000, 164(1/2): 79-89.
- [6] 杨睿, 阎贫, 吴能友, 等. 南海神狐水合物钻探区不同形态流体地震反射特征与水合物产出的关系 [J]. *海洋学研究*, 2014, 32(4): 19-26.
- [7] 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.
- [8] 张光学, 祝有海, 梁金强, 等. 构造控制型天然气水合物矿藏及其特征 [J]. *现代地质*, 2006, 20(4): 605-612.
- [9] LYOBOMIR I D. Mud volcanoes—the most important pathway for degassing deeply buried sediments [J]. *Earth Science Reviews*, 2002, 59(1/4): 49-76.
- [10] 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(1): 95-109.
- [11] MILKOV A V, VOGT P R, CRANE K. Geological, geochemical, and microbial processes at the hydrate-bearing Hkon Mosby

- mud volcano: a review [J]. *Chemical Geology*, 2004, 205(3/4): 347-366.
- [12] FESEKER T, PAPEC T, WALLMANN K. The thermal structure of the Dvurechenskii mud volcano and its implications for gas hydrate stability and eruption dynamics [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(9): 1812-1823.
- [13] 王力峰, 沙志彬, 梁金强, 等. 晚期泥底辟控制作用导致神狐海域 SH5 钻位未获水合物的分析 [J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 450-457.
- [14] BONINI M. Mud volcanoes: Indicators of stress orientation and tectonic controls [J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 115(3): 121-152.
- [15] DEVILLE E, GUERLAISA S H, CALLEC Y, 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.
- [16] 赵宝峰, 陈红汉, 孔令涛, 等. 莺歌海盆地流体垂向导体系及其对天然气成藏控制作用 [J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2014, 39(9): 1323-1322.
- [17] BROWN K M, ORANGE D L. Structural aspects of diapiric mélange emplacement: the Duck Creek diapir [J]. *Journal of Structural Geology*, 1993, 15(7): 831-847.
- [18] 张敏强, 钟志洪, 夏斌. 莺歌海盆地泥-流体底辟构造成因机制与天然气运聚 [J]. *大地构造与成矿学*, 2004, 28(2): 118-125.
- [19] MOORE J C, ROESKE S, LUNDBERG N, et al. Scaly fabrics from Deep Sea Drilling Project cores from forearcs [J]. *Geological Society of America Memoirs*, 1986, 166: 55-75.
- [20] BROWN K M. Nature and hydrogeologic significance of mud diapirs and diatremes for accretionary systems [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(6): 8969-8982.
- [21] VANNUCCHI P, MALTMAN A, BETTELLI G, et al. On the nature of scaly fabric and scaly clay [J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(5): 673-688.
- [22] TARLING M S, ROWE C D. Experimental slip distribution in lentils as an analog for scaly clay fabrics [J]. *Geology*, 2016, 44(3): 183-186.
- [23] ARCH J, MALTMAN A. Anisotropic permeability and tortuosity in deformed wet sediments [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(6): 9035-9045.
- [24] ZHANG S Q, TULLIS T E, SCRUGGS V J. Implications of permeability and its anisotropy in a mica gouge for pore pressures in fault zones [J]. *Tectonophysics*, 2001, 335(1/2): 37-50.
- [25] 郝芳, 刘建章, 邹华耀, 等. 莺歌海—琼东南盆地超压层系油气聚散机理浅析 [J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 169-180.
- [26] GOSGROVE J W. Hydraulic fracturing during the formation and deformation of a basin: A factor in the dewatering of low-permeability sediments [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(4): 737-748.
- [27] 罗晓容. 断裂成因他源高压及其地质特征 [J]. *地质学报*, 2004, 78(5): 641-648.
- [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] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 刘杰, 孙美静, 苏明, 等. 海底泥底辟(泥火山)对天然气水合物成藏的影响 [J]. *地质科技情报*, 2015, 34(5): 98-104.
- [33] 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.
- [34] LERCHE I. Mud diapirs in the South Caspian Basin: dynamical and thermal effects on hydrocarbon generation and retention [J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2010, 28(3): 131-146.
- [35] 王家豪, 庞雄, 王存武, 等. 珠江口盆地白云凹陷中央底辟带的发现及识别 [J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2006, 31(2): 209-213.
- [36] 苏明, 杨睿, 吴能友, 等. 南海北部陆坡区神狐海域构造特征及对水合物的控制 [J]. *地质学报*, 2014, 88(3): 318-326.