

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.2017.0223

张金华, 苏明, 魏伟, 等. 含气流体运移与天然气水合物成藏[J]. 地质科技情报, 2017, 36(2): 176-185.

# 含气流体运移与天然气水合物成藏

张金华<sup>1,2</sup>, 苏明<sup>3</sup>, 魏伟<sup>2</sup>, 吴能友<sup>4</sup>, 刘杰<sup>3</sup>, 杨睿<sup>3</sup>, 沙志彬<sup>5</sup>, 丛晓荣<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北 廊坊 065007;  
3. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 4. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071;  
5. 广州海洋地质调查局, 广州 510760)

**摘要:**含气流体运移是影响天然气水合物成藏的重要因素,包括流体运移方式、运移通道类型、运移效能等。基于全球典型海域天然气水合物勘探研究结果,围绕含气流体运移这一重要因素,系统回顾和总结了底辟构造、断层及裂隙和渗透层对天然气水合物形成与分布的影响。研究表明,以对流形式的运移是流体有效的运移方式,有利于烃类气体聚集及水合物成藏。已知水合物富集区内含气流体运移通道都不以单一形式存在,而是多种运移通道共同作用,呈复合型运移通道形式。在通道类型上,底辟构造、断层及裂隙、渗透层等都属于聚集型高通量流体运移通道类型,但这种通道类型与高饱和度、富集型天然气水合物藏并不存在一一对应的关系,其还与运移效能密切相关。因此有必要开展重点区域的流体运移的分析,揭示流体运移通道的展布以及运移规模,以达到更为准确预测和描述水合物藏的目的,并为水合物钻探站位部署提供有力依据。

**关键词:**天然气水合物;含气流体运移;运移通道;断层及裂隙

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

文章编号:1000-7849(2017)02-0176-10

天然气水合物(以下简称“水合物”)广泛分布于大陆边缘和极地永久冻土带,由烃类气体(主要是甲烷)和水在一定的温度和压力条件下组成的笼型似冰状物质<sup>[1-2]</sup>。全球水合物具有巨大的甲烷碳储存量,从而被视为一种潜在的接替型能源资源,同时水合物可能在全球碳循环和气候变化中发挥重要作用,并可能诱发钻井和开采等工程地质危害,使得水合物研究成为热点问题<sup>[3-8]</sup>。

研究表明,水合物成藏需具备5个基本条件:足够的气源和水;足够低的温度,通常在2.5~25℃之间;较高的压力,通常在4.5 MPa以上;一定的孔隙空间;合适的圈闭条件。当浅层气(生物成因)或(和)深成气(热成因)运移至有效的温压场并充满沉积物的孔隙时,就可以在水合物稳定带中形成水合物。此外,水合物成藏还与水的盐度、孔隙介质的结构、断面的岩性特征以及水合物形成的相态等因素有关。大量的钻孔资料和地震剖面显示,水合物主

要发育于陆缘地区的俯冲—增生楔、断裂—褶皱系、底辟构造或泥火山、“麻坑”构造、滑塌构造、海底扇和陆地多年冻土区等多种地质构造背景<sup>[9]</sup>。

针对水合物成藏理论研究,国内外学者开展了大量的工作,取得了诸多认识,且均把含气流体运移视为水合物成藏的重要组成部分。如樊栓狮等<sup>[10]</sup>基于流体载体的输导系统等因素,将海洋水合物的形成模式分为强渗漏系统和弱系统;卢振权等<sup>[11]</sup>提出了水合物成藏系统,指出水合物成藏系统应包括烃类生成体系、流体运移体系和成藏富集体系;吴能友等<sup>[12]</sup>分析认为发育的底辟和断裂等流体运移体系是神狐海域水合物成藏的关键因素;Collett<sup>[13]</sup>提出了“水合物油气系统”(gas-hydrate petroleum system)的概念,指出水合物油气系统包括水合物稳定条件、气体来源、气体运移、适合的“储层”等要素;乔少华等<sup>[14]</sup>提出了水合物运聚体系概念,认为有利运聚体系的有机结合可能是水合物富集的关键因

收稿日期:2016-05-10

编辑:禹华珍

基金项目:油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学)开放基金项目(PLC201407);国家自然科学基金项目(41576048);中国科学院青年创新促进会(2016312);中国石油—中国科学院科技合作项目(2015A-4813);中国石油油气勘探科技项目(2016B-4901)

作者简介:张金华(1983—),男,工程师,现正攻读海洋科学专业博士学位,主要从事天然气水合物等非常规能源研究工作。E-mail: zhangjh69@petrochina.com.cn

通信作者:苏明(1983—),男,副研究员,主要从事深水沉积体系及资源效应、海域天然气水合物成藏地质条件分析等方面的科研工作。E-mail: suming@ms.giec.ac.cn

素。国际海域水合物钻探结果也表明,钻获水合物的站位与含气流体运移路径及其伴生的地形地貌特征具有明显的关联性。如,日本海东缘水合物赋存区发育大量的气烟囱、“麻坑”和丘状体<sup>[15]</sup>;韩国郁龙盆地水合物赋存区和中国南海神狐海域水合物赋存区均发现了气烟囱等特征<sup>[16-17]</sup>;墨西哥湾 Atwater Valley 13/14 区块水合物赋存区发现了大量的海底丘状体等特征<sup>[18]</sup>。

因此,通过对全球范围内海域水合物实际产出区域的系统总结,集中归纳并讨论含气流体运移特征,将有助于进一步理解水合物成藏机理、分布特征和富集规律,并为我国海域水合物的站位部署提供科学借鉴。

## 1 烃类气体运移方式

充足的气源供给是水合物富集最重要的因素之一<sup>[19-20]</sup>。世界范围内的水合物钻探结果显示,浅部微生物成因气和深部热成因气均可作为水合物的气源,二者可通过甲烷中碳和氢同位素组成特征加以区别<sup>[21]</sup>。在富生烃凹陷背景下,温压、气源等条件可以为浅部水合物的形成和聚集提供适宜的条件。尽管实际水合物钻探显示,浅部水合物中的气体组分更多地表现为微生物成因或混合成因特征,如黑海、里海、墨西哥湾、地中海、挪威海等地区,但是富生烃凹陷深部优异的生排烃潜力能够提供较为充足的热成因气这一事实仍然不能忽视,如鄂霍次克海北部 Derugin 盆地、墨西哥湾 Terrebonne 盆地、麦肯齐普拉德霍湾地区均有热成因水合物的发现<sup>[22-24]</sup>。运移通道对深部气源和浅部水合物间的作用也备受关注,相关学者在刻画西南巴伦支海含气流体运移通道特征的基础上,对深部烃源岩层系与浅部流体渗漏间的关联进行了研究,并初步探讨了深部热成因气对水合物的贡献<sup>[25-26]</sup>。2015 年中国南海神狐海域 GMGS03 (Guangzhou Marine Geological Survey, 简称 GMGS) 航次 W17 站位和 W19 站位的地球化学分析结果揭示了较高含量的乙烷和丙烷,首次明确证实 II 型水合物在南海北部的存在,显示深部热成因气在浅部水合物形成和聚集过程中发挥了重要作用<sup>[27]</sup>。

通常情况下,原位生成的微生物气并不足以形成一定规模的水合物藏<sup>[28-29]</sup>。因此气体的运移是水合物稳定带内甲烷聚集的必要途径。其运移方式包括扩散相和对流相两种方式<sup>[30-31]</sup>。扩散是指气体溶解于孔隙水中,并通过浓度梯度驱动进行运移<sup>[32]</sup>;对流是指气体溶解于流体中并借助流体流动进行运

移或者以游离气进行运移的运移机制,通常出现在聚集型运移通道上,如断层、气烟囱和断背斜等<sup>[33]</sup>。在运移效能方面,扩散过程较为缓慢,通常情况下不足以形成特定规模的水合物藏<sup>[34]</sup>,而以对流形式的运移是一种非常有效的方式,有利于甲烷等烃类气体运聚。

## 2 运移通道

断层通常被视为聚集型流体运移最根本的运移通道<sup>[35]</sup>,其他类似的通道还包括底辟构造、气烟囱和高渗透层等。与周缘沉积地层相比,这些通道具有较强的渗流能力,有助于含气流体的运移<sup>[33,36-38]</sup>。在运移通道的作用下,不仅可以中将中深部—深部的热成因气,而且也可以将中浅部—浅部的微生物成因气运移到相对浅部的水合物稳定带,从而促进水合物的富集与成藏。

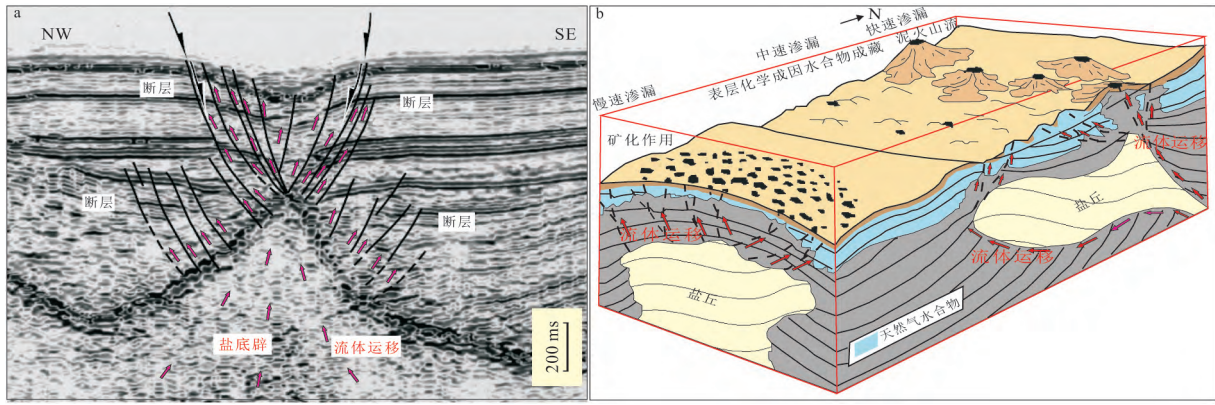
### 2.1 底辟构造

底辟构造是在地质应力的驱使下,深部或层间的塑性物质(泥、盐)垂向流动,致使沉积盖层上拱或刺穿,侧向地层遭受牵引所致。从地震剖面上看,底辟内部往往呈无反射、断续反射、底界清晰、顶面波状起伏、围岩与泥丘界限分明并且地层有上翘牵引的特征<sup>[22]</sup>。底辟构造可以作为深部气源向上运移的良好通道,使气体能够在合适的温压环境下聚集形成水合物藏,与水合物的形成及分布密切相关。

#### 2.1.1 盐底辟

在墨西哥湾、安哥拉大陆边缘、南卡罗来纳陆缘、尼日利亚陆坡及非洲西海岸刚果扇北部都发现了与盐底辟构造密切相关的水合物<sup>[39-42]</sup>,其中,墨西哥湾尤为典型。

墨西哥湾属被动大陆边缘,盆地自上三叠统到第四系发育齐全并且发育有典型的盐层、盐丘及盐盆地。盐构造活动使上覆沉积岩形成易碎区,导致墨西哥湾地区断层、裂隙等发育。盐底辟及上部的伴生断层、倾斜的地层、网状裂隙等共同构成了墨西哥湾水合物含气流体的运移通道,水合物的分布明显受到盐构造的控制。盐构造的存在沟通了深部气源,使得深部的含气流体能够自下而上输送至浅层,而上部发育的断层则能进一步使含气流体继续向上输送,同时还扩大了盐底辟本身对流体运移的影响范围(图 1-a)<sup>[43]</sup>。盐构造的空间差异性也导致水合物发育程度发生相应的变化,从北向南的盐丘个体逐渐增大,盐层顶部的连续性增大,盐的刺穿运动从北向南逐渐减弱,而水合物厚度从北向南也逐渐减薄,由快速渗漏系统过渡到慢速渗漏系统(图 1-b)<sup>[41]</sup>。



a. 盐底辟等运移通道类型及特征; b. 含气流体不同速率渗漏立体模式图

图1 墨西哥湾水合物盐底辟及含气流体运移(据文献[41,43]修改)

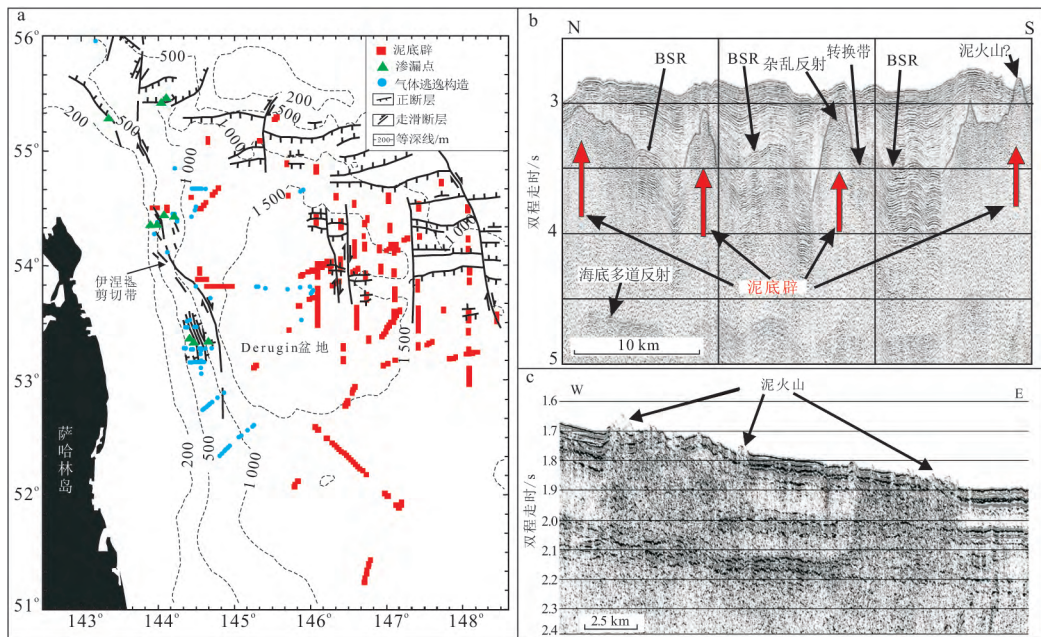
Fig.1 Salt diapirs and gas/fluid migration in Gulf of Mexico

2.1.2 泥底辟(泥火山)

近年来海域水合物的勘探实例揭示,海底泥底辟(泥火山)往往与水合物的形成和聚集密切相关。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,我国东海、东沙海域等泥底辟或泥火山发育的地区,都发现了水合物存在的证据<sup>[41,44-51]</sup>。针对海底泥底辟(泥火山)与水合物的关联性,国外学者已在含气流体的运移通道和含水合物层的空间匹配上开展了相应的研究工作<sup>[22,52-53]</sup>。

鄂霍次克板块位于太平洋板块、欧亚板块、北美板块和阿穆尔板块四大板块之间,由于受到构造挤

压作用,盆地中的沉积地层发生不同程度的褶曲,泥底辟十分发育,海底气体逃逸现象十分普遍,反映了高通量的甲烷供给(图 2-a)<sup>[22]</sup>。从地震剖面(图 2-b)可以看出,下部沉积地层褶曲变形的程度要高于上部的沉积地层。部分地区,下部沉积地层由于受到强烈挤压而刺穿上部的沉积地层形成底辟构造<sup>[22]</sup>。挤压形成的泥底辟在海底形成泥火山(图 2-c),这种泥火山在萨哈林岛东北陆坡和邻近的海盆地区尤其发育<sup>[22,54]</sup>。泥火山是流体和气体垂向运移最为有效的通道,从而有利于水合物的形成。在萨哈林岛东侧陆坡地区形成了一系列的海底泥火山、泥底辟构造,优异的构造条件和丰富的气源条件



a. 泥底辟(泥火山)及渗漏构造平面展布; b. 多个泥底辟(泥火山)通道与似海底反射 BSR 位置; c. 地震剖面上的泥火山

图2 鄂霍次克海泥底辟(泥火山)运移通道分布及特征(据文献[22]修改)

Fig.2 Distribution and features of mud diapirs / mud volcanoes migration pathways in Sea of Okhotsk

使该地区成为水合物调查研究的主要目标区<sup>[55]</sup>。俄罗斯科学院远东分院“*Akademik Lavrentiev*号”考察船于 2006 年 5 月在萨哈林岛东北陆坡地区进行了海底地形、浅地层、海底回声测量及重力取样,并成功采获了水合物样品<sup>[56]</sup>。

此外,泥底辟(泥火山)也可能造成水合物层的分解与破坏。刘杰等<sup>[57]</sup>认为海底泥底辟(泥火山)的不同演化阶段将对水合物的形成和富集产生不同的影响。早期阶段,泥底辟(泥火山)形成的运移通道并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,有利于水合物的生成;晚期阶段,泥火山喷发带来的高热量含气流体引起水合物稳定带的热异常,可能导致水合物的分解。

### 2.1.3 气烟囱

气烟囱是地震剖面上的异常反射,在地震剖面通常表现为弱震幅、弱连续性特征,其形状多为柱状,有的则是椭圆状或锥形<sup>[58]</sup>。在海洋沉积物中,气烟囱广泛分布,并被视作流体运移通道<sup>[33]</sup>。研究显示,气烟囱与水合物生成与分布密切相关,已在韩国郁龙盆地、我国南海、挪威近海、布莱克海台、北极斯瓦尔巴特群岛海域等地区的气烟囱发育区域,发现了较好的水合物显示<sup>[16-17,59-60]</sup>。

气烟囱是郁龙盆地最主要的流体运移通道,作为郁龙盆地水合物站位布置的重要依据之一,共布置了 UBGH1-9、UBGH1-10、UBGH2-2-1、UBGH2-3、UBGH2-7 和 UBGH2-11 共 6 个与气烟囱有关的站位(图 3-a),钻探发现了裂隙充填型的较高饱和度水合物<sup>[61]</sup>。这些气烟囱可以分成两大类型,一类为终止于海底以下沉积物中的气烟囱,另一类刺穿海底形成冷泉<sup>[62]</sup>。气烟囱使深部热成因气运移到浅部地层<sup>[62]</sup>,流体的快速充注会加速水合物的形成,造成了沉积层变形或海底地形变化,进而在浅层形成水合物帽(hydrate cap),在海底形成地形高地水合物丘(hydrate mound)等<sup>[63]</sup>(图 3-b)。

## 2.2 断层/裂隙

断层为天然气从深部地层向浅部地层运移提供了通道,天然气可以沿断层抵达水合物稳定带,在断裂破碎带还可以形成渗漏型水合物。在布莱克海台、水合物脊、墨西哥湾、挪威近海 Storegga 滑塌区、北极地区的波弗特海和印度大陆边缘等地的地震剖面上,除发现明显的似海底反射 BSR、底辟构造外,断层也非常发育<sup>[43,59-60,64]</sup>。

Ruppel 等<sup>[65]</sup>认为裂隙的存在增大了沉积物的次级孔隙度和渗透率,并促进了汇聚型流体流动的形成,有利于水合物的形成。Cook 等<sup>[66]</sup>认为,当孔隙水中甲烷浓度超过其溶解度时,水合物会沿着沉积物

的破裂面充填于孔隙之中。沉积物沿着平行于最大主应力的方向(竖直方向)破裂,因此水合物通常呈直立充填状。世界范围内近年来的水合物勘探研究表明,裂隙充填型水合物比之前估计的更为常见,如水合物脊、卡斯卡迪亚大陆边缘、印度 Krishna-Godavari (K-G)盆地,以及韩国郁龙盆地等等<sup>[61,67-69]</sup>。

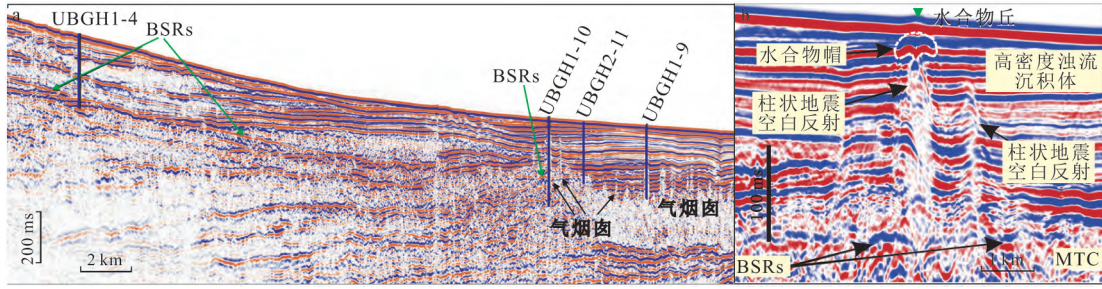
### 2.2.1 断层

K-G 盆地是位于印度东海岸的一个含油气盆地,为 2006 年印度国家水合物项目第 01 航次(NG-HP-01)主要钻探目标之一。由于正断层和逆冲断层作用,K-G 盆地地层发生明显的构造变形,并且构造变形从典型正断层环境向逆冲断层环境逐渐变化(图 4-a),这些逆冲断层是深部流体向水合物稳定带运移的首选通道<sup>[64]</sup>。其中,NGHP-01-10 站位最为典型,地震属性分析显示分布于 NGHP-01-10 站位周围的断裂系统主要由断裂组 A 及断裂组 B 组成,两组不同延伸方向的断层平面上在 NGHP-01-10 站位处形成一个“三角形”,面积达 2.5 km<sup>2</sup>。在这个三角区域内,断裂在平面上呈现出多边形断层的特征,进一步扩大了水合物的分布范围<sup>[70]</sup>(图 4-b)。富含水合物的三角区被两条作为游离气运移通道的断层所限制,含气流体的运移被认为是此处水合物聚集的关键因素,断层作用驱动着深部游离气向海底方向运移,同时张性断层又为气体运移到水合物稳定带提供了必要的通道。

俯冲—增生型弧前增生楔断层和褶皱发育,在挤压应力场作用下,深部的含烃类流体向上运移、富集,进入水合物稳定带后形成水合物堆积体,在其浅层内往往可以发现水合物存在的地震标志 BSR。台西南盆地位于欧亚大陆东南缘、南中国海东北部,在构造上处于欧亚板块与菲律宾板块、西太平洋板块聚敛带上,是南海向菲律宾海板块俯冲的产物<sup>[71]</sup>。台湾增生楔发育大量的逆掩断层(图 5-a),这些断层为烃类气体运移到适合形成水合物并可以得到保存的稳定区域提供了良好的通道。当烃类气体进入合适的温压场并充满沉积物的空隙就可以形成水合物。水合物层自身形成了一个无渗透性的盖层,在下方能捕获大量的游离性气体,两者之间的波阻抗就使得在地震剖面上出现强烈的反射波 BSR,而 BSR 上方由于地层胶结,振幅明显降低而形成空白带(图 5-b)。

### 2.2.2 裂隙

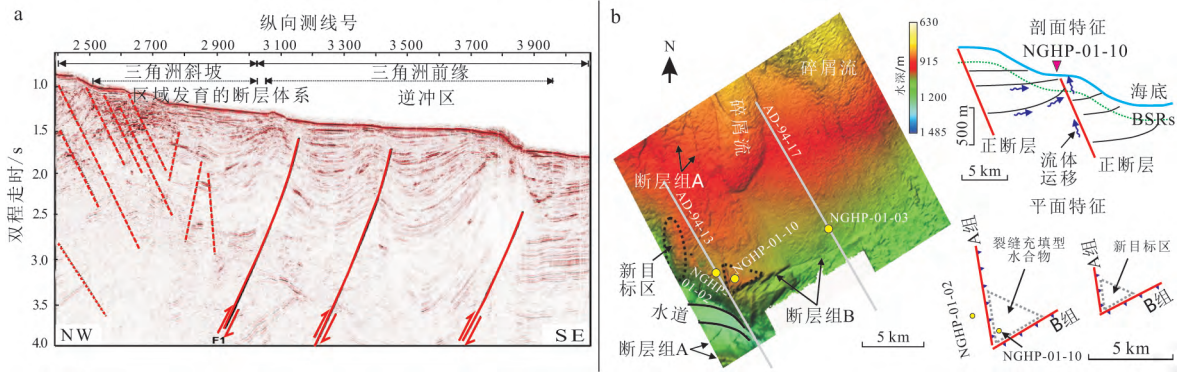
除了大尺度的断裂体系之外,小尺度的裂隙/网状裂隙也能够作为含气流体的运移通道。以墨西哥湾 AC21 站位为例,含水合物地层出现于浅部的富砂质薄层中,其下部为厚层的泥质—粉砂质的块体流沉积体,来自深部热成因气和局部生物成因气进



a. 气烟囱与钻探站位位置; b. 水合物帽及水合物丘地震反射特征

图3 郁龙盆地气烟囱构造(据文献[61,63]修改)

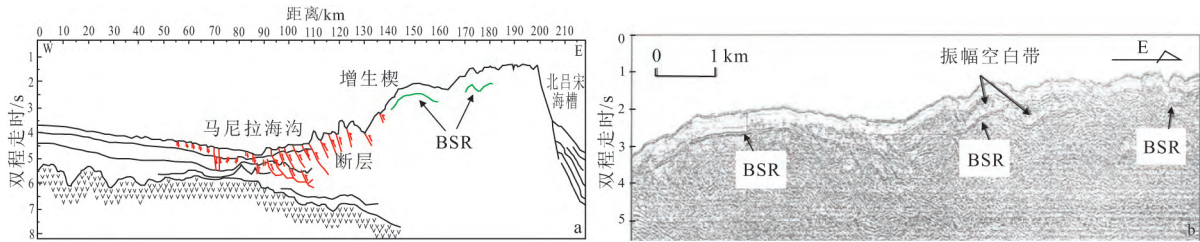
Fig. 3 Gas chimneys in Ulleung Basin



a. 逆冲断层—正断层转换的地震剖面特征; b. 2组正断层的平面展布及对水合物的控制

图4 K-G盆地断层与天然气水合物分布(据文献[64,70]修改)

Fig. 4 Distribution of faults and hydrates in K-G Basin



a. 俯冲作用及运移通道特征; b. 地震反射剖面上的水合物赋存特征

图5 增生楔背景下断层与天然气水合物(据文献[71]修改)

Fig. 5 Faults and hydrates in the background of accretionary prism

入到水合物稳定带中就成了水合物能否形成的关键因素。通过对高分辨地震资料进行地震属性异常分析和自动运算,能够描述出小尺度网状裂隙的特征,这些裂隙穿过整个富泥质的块体流沉积体(mass transport complex,简称 MTC),为含气流体的运移提供了大量的弯曲状、复杂的通道<sup>[72]</sup>(图 6-a)。

郁龙盆地水合物分布主要受裂隙和粗粒沉积物控制,表现为裂隙填充型水合物和富砂储层孔隙弥散型水合物两大类<sup>[61]</sup>。裂隙在郁龙盆地地层中广泛发育,常与气烟囱构造伴生,其角度大多介于 28°~66°之间,这些既是良好的流体运移通道,又是较好的水合物储集空间(图 6-b)。含气流体沿着裂隙

进一步运移,并可在裂隙中形成水合物,通过 X 射线和 CT 成像可以清楚看到赋存在裂隙中的水合物<sup>[17]</sup>(图 6-c)。

### 2.3 渗透层

地层中的高渗透层(如火山灰层、高渗透砂层等)是含气流体运移的良好通道,对气体的运移和聚集构成重要的影响,从而影响着水合物的成藏。

#### 2.3.1 火山灰层

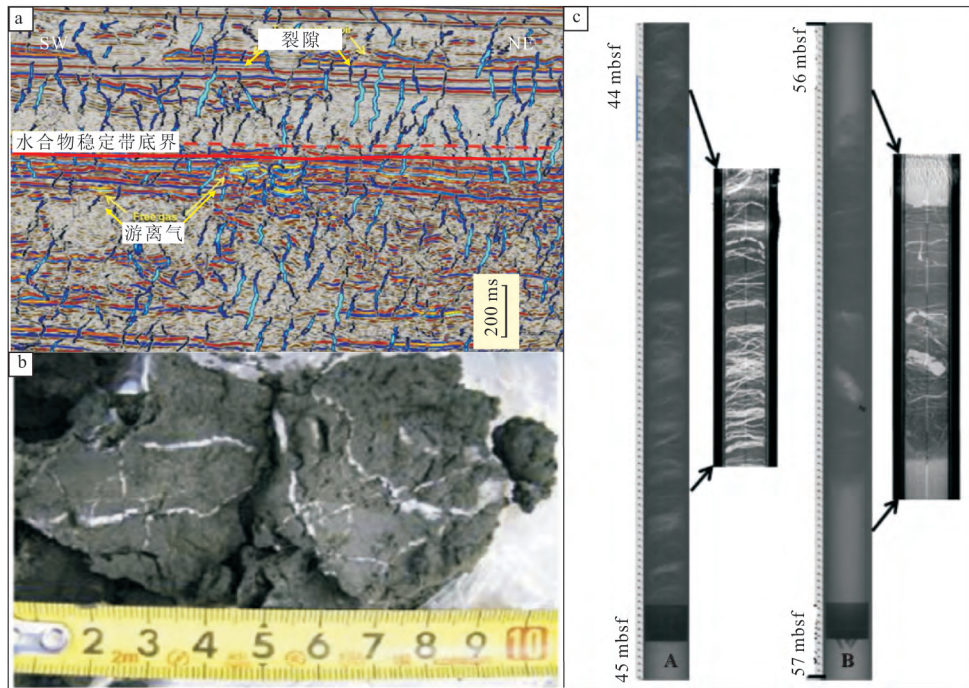
ODP 204 航次位于俄勒冈海域卡斯卡迪亚边缘,1245 站位处于水合物脊西翼 870 m 水深处,从地震剖面中可以观察到明显的 BSRs,分别切穿强反射层“A 层”、“B 层”和“Y 层”(图 7-a)。反射层 A 是一富

火山灰地层,通过钻井站位取样,为粗粒沉积,渗透性好,元素地球化学分析表明,反射层 A 是甲烷气从增生复合体向水合物脊顶部运移的流体通道,能够将烃类气体运移至水合物稳定带之内<sup>[73]</sup>,而位于稳定带之内的强反射层也可以作为潜在的储层,位于强反射层之内的水合物往往具有更高的饱和度。

### 2.3.2 砂层

由于墨西哥湾构造事件(如盐底辟等)的影响,区域上会造成地层发生倾斜,倾斜的地层可以作为

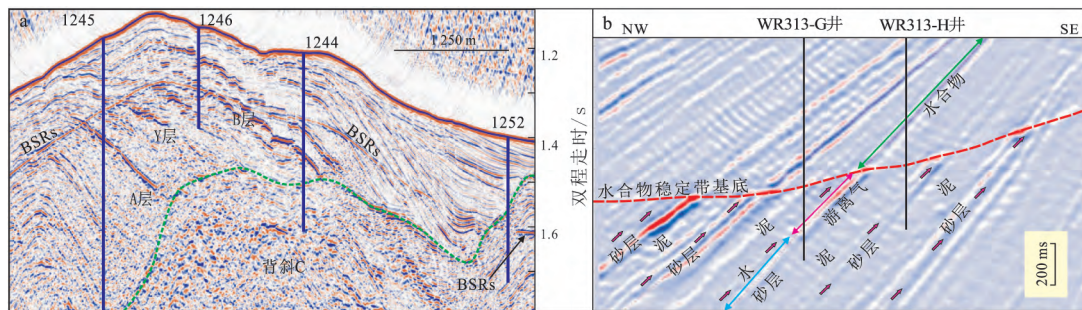
含气流体运移的重要通道,特别是侧向连通性较好的砂体<sup>[74]</sup>。同时,由于地层沉积单元中泥砂互层的特征,造成岩性具有明显的非均质性特征,使得气体的运移和聚集趋向于粗粒沉积物中。含气流体沿着倾斜的地层向上输送,在高孔高渗的砂体单元内,游离气与水由于浮力而分离,游离气向上运移在上倾方向形成水合物,而水合物的形成则阻碍游离气的进一步运移<sup>[23]</sup>(图 7-b),导致强振幅反射同相轴存在定向终止的特征,可视为水合物稳定带基底。



a. 墨西哥湾水合物裂隙运移通道特征;b. 郁龙盆地裂隙型水合物;c. 郁龙盆地 X 射线和 CT 成像下裂隙特征与水合物赋存

图 6 裂隙作用下的水合物赋存(据文献 [17,61,72]修改)

Fig. 6 Occurrence characteristic of hydrates in the action of fractures



a. 过 ODP 204 航次 1245、1246、1244 和 1252 站位地震剖面的强反射层特征;b. WR313 站位砂层作用下的水合物赋存

图 7 与渗透层运移通道作用相关的水合物(据文献[23,73]修改)

Fig. 7 Hydrates related to the migration pathways of permeable layers

## 3 讨论

底辟构造、断层及裂隙、渗透层等都属于聚集型高通量流体运移(focused high-flux, 简称 FHF)通

道类型。但从世界上典型水合物藏分析可以看出,这种 FHF 通道类型与高饱和度、富集水合物藏并不存在一一对应的关系。这可能与流体运移通道的运移效能存在着一定的关系。流体在下部地层中运

移时为聚集型流体流动,而到上部地层中运移时就转变成分散型流体流动(图8)<sup>[75]</sup>。

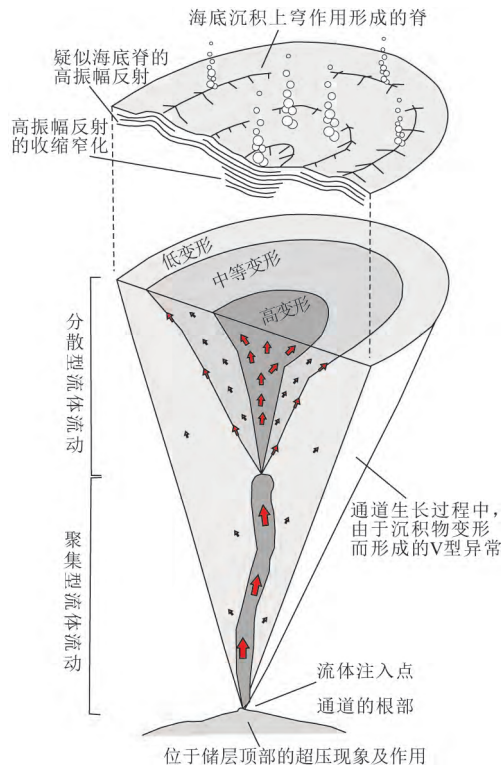


图8 运移通道的发育及生长模式图(据文献<sup>[75]</sup>修改)

Fig. 8 Model of migration pathway initiation and propagation

2007年神狐海域 GMGS01 航次的水合物钻井资料显示站位 SH2、SH3 和 SH7 都钻获了水合物,饱和度也相对较低(2%~15%),而其余各站位均无明显的水合物指示特征<sup>[12]</sup>。对比站位 SH7 和 SH6、SH9 附近地震剖面可以发现,虽然这3口井都位于气烟囱顶部或者周缘,但各井周围的断层分布存在明显的区别:与气烟囱伴生并位于其侧部的中小尺度正断层发育程度存在差异。SH7 附近正断层发育数量明显较 SH6 和 SH9 附近正断层多,大量的正断层扩大了气烟囱对流体运移的作用范围,更利于 CH<sub>4</sub> 向稳定带内汇聚<sup>[14]</sup>。相比较,2015年神狐海域 GMGS03 航次钻获了大量高饱和度(20%~70%)水合物,区块以底辟构造和大尺度断层作为含气流体运移通道。两个航次钻探的水合物存在差异的原因可能是 GMGS01 区块的流体运移效能相对较低,同时,在 GMGS03 区块深部热成因气可能通过含气流体运移通道运移至浅部的水合物稳定带中。

## 4 结论

(1)通过对世界上典型水合物藏的含气流体运

移通道分析显示,每个地区水合物藏的含气流体运移通道都不是以单一的形式存在,而是多种运移通道共同作用,呈复合型运移通道形式存在。针对复合型运移通道类型的识别,在宏观上,要开展地质背景下的构造演化分析,在中尺度上,要结合海底地形地貌标志和地球化学分析开展研究分析,在微尺度上,要开展流体通道的精细刻画研究。

(2)在分析运移通道时,需要对运移通道的运移效能开展分析,进行定量、半定量的评价。应当与地球化学勘查识别相结合,综合“麻坑”、烟囱、泥火山等可能显示高通道气体释放作用引起的微地形地貌标志半定量分析,共同进行水合物类型的识别。

(3)从世界范围内水合物资源调查和钻探结果来看,对范围有限的水合物赋存区域,开展“水合物运聚体系”的研究是非常必要的。实际地质条件下,含气流体运移通道会表现出差异性,影响垂向/侧向的流体运移,从而导致靶区内水合物分布及富集程度的不均匀性。因此有必要开展重点区域的流体运移的分析,揭示流体运移通道的展布以及运移规模,以达到更为准确预测和描述水合物藏,并为水合物钻探站位部署提供有力依据。

## 参考文献:

- [1] Kvenvolden K A. Gas Hydrates: Geological perspective and global change [J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(2): 173-187.
- [2] Sloan E D, Koh C A. Clathrate hydrates of natural gases. [M]. third-ed. Boca Raton London, New York: CRC Press, 2008: 1.
- [3] MacDonald G J. Role of methane clathrates in past and future climates[J]. *Climatic Change*, 1990, 16(3): 247-281.
- [4] Paull C K, Ussler III W, Dillon W P, et al. Potential role of gas hydrate decomposition in generating submarine slope failures [C]// Max M D. *Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000: 149-156.
- [5] Dickens G R. Modeling the global carbon cycle with a gas hydrate capacitor: Significance for the latest Paleocene thermal maximum[C]// Paull C K, Dillon W P. *Natural gas hydrates: Occurrence, distribution, and detection*. [S. l.]: American Geophysical Union, *Geophysical Monograph Series*, 2001, 124: 19-40.
- [6] Hovland M, Gudmestad O T. Potential influence of gas hydrates on seabed installations[C]// Paull C K, Dillon W. *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution and Detection*. [S. l.]: American Geophysical Union, *Geophysical Monograph Series*, 2001, 124: 307-315.
- [7] Sassen R, Losh S L, Cathles L, et al. Massive vein-filling gas hydrate: Relation to ongoing gas migration from the deep subsurface in the Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18: 551-560.
- [8] Collett T S. Energy resource potential of natural gas hydrates [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1971-1992.

- [9] 王健,邱文弦,赵俐红. 天然气水合物发育的构造背景分析[J]. 地质科技情报, 2010, 29(2):100-106.
- [10] 樊栓狮,刘锋,陈多福. 海洋天然气水合物的形成机理探讨[J]. 天然气地球科学, 2004, 1(5):524-530.
- [11] 卢振权,吴能友,陈建文,等. 试论天然气水合物成藏系统[J]. 现代地质, 2008, 22(3):363-375.
- [12] 吴能友,杨胜雄,王宏斌,等. 南海北部陆坡神狐海域天然气水合物成藏的流体运移体系[J]. 地球物理学报, 2009, 52(6):1641-1650.
- [13] Collett T S. Gas Hydrate Petroleum Systems in Marine and Arctic Permafrost Environments[R/OL]. GCSSEPM Proceedings, 2009. <http://gcsproceedings.sepmonline.org/content/gcs029/1/SEC8.body.pdf>.
- [14] 乔少华,苏明,杨睿,等. 运聚体系-天然气水合物不均匀性分布的关键控制因素初探[J]. 新能源进展, 2013, 1(3):245-256.
- [15] Nakajima T, Kakuwa Y, Yasudomi Y, et al. Formation of pockmarks and submarine canyons associated with dissociation of gas hydrates on the Joetsu Knoll, eastern margin of the Sea of Japan [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 90:228-242.
- [16] Sun Yunbao, Wu Shiguo, Dong Dongdong, et al. Gas hydrates associated with gas chimneys in fine-grained sediments of the northern South China Sea [J]. Marine Geology, 2012, 311/314:32-40.
- [17] Kim G Y, Narantsetseg B, Ryu B J, et al. Fracture orientation and induced anisotropy of gas hydrate-bearing sediments in seismic chimney-like-structures of the Ulleung Basin, East Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 47:182-194.
- [18] Wood W T, Hart P E, Hutchinson D R, et al. Gas and gas hydrate distribution around seafloor seeps in Mississippi Canyon, Northern Gulf of Mexico, using multi-resolution seismic imagery[J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25:952-959.
- [19] Kvenvolden K A. A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate[J]. Organic Geochemistry, 1995, 23(11/12):997-1008.
- [20] Pohlman J W, Kaneko M, Heuer V B, et al. Methane sources and production in the northern Cascadia margin gas hydrate system [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 287(3/4):504-512.
- [21] Milkov A V. Molecular and stable isotope compositions of natural gas hydrates: A revised global dataset and basic interpretations in the context of geological settings [J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(5):681-702.
- [22] 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.
- [23] Boswell R, Collett T S, Frye M, et al. Subsurface gas hydrates in the northern Gulf of Mexico[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 34:4-30.
- [24] Collett T S. Permafrost-associated gas hydrate accumulations [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 1993, 715(1):247-269.
- [25] Ostanin I, Anka Z, di Primio R, et al. Hydrocarbon plumbing systems above the Snøhvit gas field: Structural control and implications for thermogenic methane leakage in the Hammerfest Basin, SW Barents Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 43:127-146.
- [26] Vadakkepulyambatta S, Bünz S, Mienert J, et al. Distribution of subsurface fluid-flow systems in the SW Barents Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 43:208-221.
- [27] Yang Shengxiong, Zhang Mei, Liang Jinqiang, et al. Preliminary results of China's third Gas hydrate drilling expedition: A critical step from discovery to development in the South China Sea [J]. Fire in the Ice, 2015, 15(2):1-6.
- [28] Paull C K, Ussler W, Borowski W A. Sources of biogenic methane to form marine gas hydrates: In Situ production or upward migration [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 1994, 715(1):392-409.
- [29] Uchida T, Moriawaki M, Takeya S, et al. Two-step formation of methane-propane mixed gas hydrates in a batch-type reactor [J]. AIChE J., 2004, 50(2):518-523.
- [30] Liu Xiaoli, Flemings P B. Passing gas through the hydrate stability zone at southern Hydrate Ridge, offshore Oregon [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 241(1/2):211-226.
- [31] Haacke R R, Westbrook G K, Hyndman R D. Gas hydrate, fluid flow and free gas: Formation of the bottom-simulating reflector [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 261(3/4):407-420.
- [32] Miller P, Dasgupta S, Shelander D. Seismic imaging of migration pathways by advanced attribute analysis, Alaminos Canyon 21, Gulf of Mexico [J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 34:111-118.
- [33] Berndt C. Focused fluid flow in passive continental margins [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, 2005, 363:2855-2871.
- [34] Xu Wenyue, Ruppel C. Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrate in porous marine sediments [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1999, 104(B3):5081-5095.
- [35] Ingram G M, Chisholm T J, Grant C J, et al. Deep water North West Borneo: Hydrocarbon accumulation in an active fold and thrust belt [J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21:879-887.
- [36] Abrams M A. Geophysical and geochemical evidence for subsurface hydrocarbon leakage in the Bering Sea, Alaska [J]. Marine and Petroleum Geology, 1992, 9:208-221.
- [37] Cartwright J, Huuse M, Aplin A. Seal bypass systems [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(8):1141-1166.
- [38] Gay A, Lopez M, Berndt C, et al. Geological controls on focused fluid flow associated with seafloor seeps in the Lower Congo Basin [J]. Marine Geology, 2007, 244(1/4):68-92.
- [39] Ewing J I, Hollister C H. Regional aspects of deep sea drilling in the western North Atlantic: Initial Reports of Deep Sea Drilling Project [R]. Washington: Government Printing Office, 1972, 11:951-971.
- [40] Egorov A V, Crane K, Vogt P R, et al. Gas hydrates that outcrop on the sea floor: Stability models [J]. Geo-Marine Letters, 1999, 19(1):68-75.
- [41] Robert H H, Hardage B A, Shedd W W, et al. Seafloor reflectivity: An important seismic property for interpreting fluid/gas expulsion geology and the presence of gas hydrate [J]. The Leading Edge, 2006, 25(5):620-628.
- [42] Serie C, Huuse M, Schødt N H. Gas hydrate pingoes: Deep sea-floor evidence of focused fluid flow on continental margins [J].



- Geology, 2012, 40(3): 207-210.
- [43] Rowan M G, Jackson M P A, Trudgill B D. Salt-related fault families and fault welds in the northern Gulf of Mexico [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(9): 1454-1484.
- [44] Ginsburg G D, Soloviev V A. Mud volcano gas hydrates in the Caspian Sea [J]. Bulletin of the Geological Society of Denmark, 1994, 41: 95-100.
- [45] Martin J B, Kastner M, Henry P, et al. Chemical and isotopic evidence for sources of fluid in a mud volcano field seaward of the Barbados accretionary wedge [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1996, 101(B9): 20325-20345.
- [46] Vogt P R, Cherkashev G, Ginsburg G, et al. Hakon Mosby mud volcano provides unusual example of venting [J]. EOS Transactions American Geophysical Union, 1997, 78(48): 549-557.
- [47] Woodside J M, Ivanov M K, Limonov A F. Neotectonics and fluid flow through seafloor sediments in the Eastern Mediterranean and Black Seas; Parts I and II [R]. [S. l.]: Intergovernmental Oceanographic Commission Technical Series, 48, 1997.
- [48] Heggland R, Nygaard E. Shale intrusions and associated surface expressions — examples from Nigerian and Norwegian deepwater areas [C] // Proc. Offshore Technology Conference, Houston: TX, 1998, 1: 111-124.
- [49] Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates [J]. Marine Geology, 2000, 167(12): 29-42.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] Satyavani N, Thakur N K, Kumar N A, 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.
- [54] Shakirov R, Obzhirov A, Suess E, et al. Mud volcanoes and gas vents in the Okhotsk Sea area [J]. Geo-Marine Letter, 2004, 24: 140-149.
- [55] 栾锡武, 赵克斌, 孙冬胜, 等. 鄂霍次克海天然气水合物成藏条件分析 [J]. 海洋地质与第四季地质, 2006, 26(6): 91-100.
- [56] 栾锡武, 赵克斌, Obzhirov A, 等. 鄂霍次克海浅表层天然气水合物的勘查识别和基本特征 [J]. 中国科学: 地球科学, 2008, 38(1): 99-107.
- [57] 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.
- [58] Kang N K, Yoo D G, Yi B Y, et al. Distribution and origin of seismic chimneys associated with gas hydrate using 2D multi-channel seismic reflection and well log data in the Ulleung Basin, East Sea [J]. Quaternary International, 2016, 392: 99-111.
- [59] Cathles L M, Su Zheng, Chen Duofu. The physics of gas chimney and pockmark formation, with implications for assessment of seafloor hazards and gas sequestration [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27: 82-91.
- [60] Petersen C J, Büinz S, Hustoft S, et al. High-resolution P-Cable 3D seismic imaging of gas chimney structures in gas hydrated sediments of an Arctic sediment drift [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27: 1981-1994.
- [61] Ryu B J, Collett T S, Riedel M, et al. Scientific results of the second gas hydrate drilling expedition in the Ulleung Basin (UBGH2) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 47: 1-20.
- [62] Choi J Y, Kim J H, Torres M E, et al. Gas origin and migration in the Ulleung Basin, East Sea: Results from the Second Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition (UBGH2) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 47: 113-124.
- [63] Chun J H, Ryu B J, Son B K, et al. Sediment mounds and other sedimentary features related to hydrate occurrences in a columnar seismic blanking zone of the Ulleung Basin, East Sea, Korea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28: 1787-1800.
- [64] Riedel M, Collett T S, Shankar U. Documenting channel features associated with gas hydrates in the Krishna-Godavari Basin, Offshore India [J]. Marine Geology, 2011, 279(1/4): 1-11.
- [65] Ruppel C, Kinoshita M. Fluid, methane, and energy flux in an active margin gas hydrate province, offshore Costa Rica [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 179(1): 153-165.
- [66] Cook A E, Goldberg D. Extent of gas hydrate filled fracture planes; Implications for in situ methanogenesis and resource potential [J/OL]. Geophysical Research Letters, 2008, 35, L15302. doi: 10.1029/2008GL034587.
- [67] Suess E, Bohrmann G, Ricker D, et al. Properties and fabric of near-surface methane hydrates at hydrate ridge, Cascadia margin [C] // Proceedings of International Conference on Gas Hydrates, Yokohama, Japan; [s. n.], 2002: 740-744.
- [68] Riedel M, Collett T, Malone M J, et al. Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Volume 311 [C] // Washington D C: Integrated Ocean Drilling Program Management International, 2006.
- [69] Rees E V L, Priest J A, Clayton C R I. The structure of methane gas hydrate bearing sediments from the Krishna-Godavari Basin as seen from Micro-CT scanning [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28: 1283-1293.
- [70] Riedel M, Collett T S, Kumar P, et al. Seismic imaging of a fractured gas hydrate system in the Krishna-Godavari Basin Offshore India [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27: 1476-1493.
- [71] 丁巍伟, 陈汉林, 王渝民, 等. 台湾增生楔天然气水合物的地震特征 [J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(1): 90-96.
- [72] Miller P, Dasgupta S, Shelander D. Seismic imaging of migration pathways by advanced attribute analysis, Alaminos Canyon 21, Gulf of Mexico [J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 34: 111-118.
- [73] Teichert B M A, Torres M E, Bohrmann G, et al. Fluid sources, fluid pathways and diagenetic reactions across an accretionary prism revealed by Sr and B geochemistry [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 239(1/2): 106-121.
- [74] Frye M. Preliminary evaluation of in-place gas hydrate resources; Gulf of Mexico Outer Continental Shelf [R/OL]. Minerals Management Service Report 2008-004. <http://www.mms.gov/revdiv/GasHydrateAssessment.htm>.
- [75] Gay A, Mourgues R, Berndt C, et al. Anatomy of a fluid pipe in the Norway Basin: Initiation, propagation and 3D shape [J]. Marine Geology, 2012, 332/334: 75-88.

## Relationship Between Gas-Bearing Fluids Migration and Accumulation of Natural Gas Hydrate

Zhang Jinhua<sup>1,2</sup>, Su Ming<sup>3</sup>, Wei Wei<sup>2</sup>, Wu Nengyou<sup>4</sup>, Liu Jie<sup>3</sup>,  
Yang Rui<sup>3</sup>, Sha Zhibin<sup>5</sup>, Cong Xiaorong<sup>3</sup>

- (1. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;  
2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Langfang,  
Langfang Hebei 065007, China; 3. Guangzhou Institute of Energy Conversion,  
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 4. Qingdao Institute of  
Marine Geology, Qingdao Shandong 266071, China;  
5. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

**Abstract:** Gas-bearing fluids migration, mainly including fluid migration pattern, migration pathway, and migration efficiency, is one of the important factors affecting natural gas hydrate accumulation. Based on the progress of global marine gas hydrate explorations and researches, focusing on gas-bearing fluids migration, we mainly summarize several migration pathways, such as diapir structure, fault/fracture and permeable layer to understand their effect or impact on the formation and distribution of gas hydrate. Research results show that fluid convection is an effective migration pattern, which is beneficial for the hydrocarbon gas accumulation and gas hydrate formation and concentration. Almost all known-natural gas hydrate occurrence zones develop multi-type migration pathways, not single-type pathway, and individual hydrate occurrence is commonly affected by various gas-bearing fluids migration pathways. In terms of pathway types, diapir structures, fault/fractures and permeable layers all belong to focused high-flux migration pathway, conducive for hydrate formation and accumulation. However this focused high-flux migration pathway type does not mean the existence of high saturation and enrichment of gas hydrate. The focused high-flux migration pathway does not have a one-to-one correlation with high saturation and enrichment of gas hydrate. As high saturation and enrichment of gas hydrate is still closely related to migration efficiency. Therefore, it is necessary to analyze the gas-bearing fluids migration in key hydrate occurrence areas, and then reveal the distribution of fluid migration pathways and the size of migration flux. With these analyses, the predictions and descriptions of hydrates would be more accurate, and they could also be reasons for site selections of marine gas hydrates.

**Key words:** natural gas hydrate; gas-bearing fluids migration; migration pathway; fault/fracture