

试论天然气水合物成藏系统

卢振权¹，吴能友²，陈建文³，龚建明³，吴必豪¹

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 中国地质调查局 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075;
3. 中国地质调查局 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 针对天然气水合物理论预测和实际产出的不一致性、各种标志或异常未与天然气水合物建立起严格的对应关系、世界范围内已知或由 BSR 等间接指标所指示的天然气水合物在垂直方向和水平方向上分布的不确定性, 如何更好地从地质系统论角度研究天然气水合物成藏过程和分布规律, 尝试提出天然气水合物成藏系统概念, 分别从烃类生成体系、流体运移体系、成藏富集体系对天然气水合物成藏过程进行了初步探讨; 同时运用此思路对世界上调查研究程度较高的分布区开展了天然气水合物成藏系统初步分析。

关键词: 天然气水合物; 成藏系统; 烃类生成体系; 流体运移体系; 成藏富集体系

中图分类号: P744.4 TE122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8527(2008)03-0363-13

Preliminary Discussion on Gas Hydrate Geological System

LU Zhen-quan¹, WU Neng-you², CHEN Jian-wen³, GONG Jian-ming³, WU Bi-hao¹

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou, Guangdong 510075; 3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao, Shandong 266071)

Abstract In consideration of the discrepancy between gas hydrate theoretical prediction and its real occurrence, the inconsistent relationship between gas hydrate indicator and its existence, the irregular gas hydrate distribution law (vertically and horizontally) indicated by drilling and indirect evidence such as BSR around the world, how to strengthen studies on gas hydrate formation process and its distribution law seems practically significant in geological view. This paper attempts to bring forward the concept of gas hydrate geological system, which contains three components of gaseous hydrocarbon source sub-system, gas-bearing fluid migration sub-system and gas hydrate reservoir accumulation sub-system. In the meanwhile, some key gas hydrate geological systems are preliminarily summarized based on worldwide typical gas hydrate occurrences.

Key words gas hydrate; geological system; gaseous hydrocarbon source sub-system; gas-bearing fluid migration sub-system; gas hydrate reservoir accumulation sub-system

0 引言

近 30 年来, 天然气水合物逐渐成为新类型替代能源的重点研究领域。此间, 各国科学家开展了大量的调查研究工作, 取得了许多重要进展。去年, 我国在南海北部陆坡实现了天然气水合物钻探取样的成功, 取得了突破性进展。然而, 到

目前为止, 正如 Dickens^[1] 指出的那样, 甲烷是如何产生, 如何传输, 又是如何在沉积层中形成天然气水合物的过程, 还知之不多。虽然科学家从不同角度注意到形成天然气水合物的烃类气体从哪里来(如原地、下部或深部), 经过何种作用(如扩散或对流作用等), 如何在天然气水合物稳定带中形成天然气水合物等作用过程, 他们在研究中

收稿日期: 2008-02-10; 改回日期: 2008-05-22; 责任编辑: 楼亚儿。
基金项目: 中国地质调查局重大专项“我国海域天然气水合物资源调查与评价专项”(“118”专项); 中央公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目“青藏高原多年冻土区天然气水合物形成条件模拟及预测”。

作者简介: 卢振权, 男, 研究员, 1972 年出生, 地球化学专业, 主要从事天然气水合物与油气的地球化学勘查研究工作。
Email: luzhq@vip.sina.com.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

也曾注意到烃类气体供应问题、断裂通道及烃类流体运移问题、岩层和构造对天然气水合物产状与分布影响或控制问题的重要性，并就其中的某一或某些方面单独开展过研究，但没有将三者作为一个有机整体在时空尺度上开展有关天然气水合物成藏系统的研究，即缺乏对天然气水合物成藏过程的系统认识，缺乏对天然气水合物成藏要素匹配关系的研究。本文从地质系统论角度出发，尝试提出天然气水合物成藏系统的概念，分别从烃类生成体系、流体运移体系、天然气水合物成藏富集体系对天然气水合物成藏过程进行初步的探讨；同时对世界上天然气水合物调查研究程度较高地区的天然气水合物成藏系统进行初步的分析。

1 天然气水合物成藏系统概念的提出

理论预测认为，全球 90% 的海域存在着天然气水合物，但实际上到目前为止只在有限的海域中发现了天然气水合物，如美国 Blake 脊、加拿大外海 Cascadia 大陆边缘、墨西哥湾、北加利福尼亚外海、日本 Nankai 海槽、中美洲危地马拉外海、俄罗斯黑海、里海、Okhotsk 海、Barents 海、挪威近海、西非大陆边缘等。固然，随着勘查技术的不断进步，肯定会有越来越多的天然气水合物产地被发现。但是，这种理论预测和实际产出的不一致性是一个不争的事实。

微观上，BSR 是指示天然气水合物产出的已知最好的间接标志，但地震 BSR 并非总是与天然气水合物相对应，如在天然气水合物产出情况下有时并没有 BSR 显示^[2]；沉积物孔隙水中氯离子浓度降低常常指示着天然气水合物的存在，但有时也并不这样，甚至相反，如“水合物海岭”区 (Hydrate Ridge) 天然气水合物产出层段沉积物孔隙水中氯离子浓度反而出现升高^[3]。这些标志或异常并未与天然气水合物建立起严格的必然联系。

在世界范围内已知的或由 BSR 等间接指标所指示的天然气水合物在垂直方向和水平方向上的分布十分不连续且不均匀^[3-5]，虽然一些科学家认为这种分布的不均匀性可能受流体来源和沉积物属性的控制^[4]，或受到气体及流体来源与流量变化、岩石学属性和特征、地质构造和古海洋环境、微生物活动等因素及营力的控制与影响^[5]，但是，具体什么因素控制着天然气水合物成藏并

不十分清楚。虽然不同地质因素控制下具有不同的成藏地质模式，但是各地区地质构造环境和天然气水合物成藏所需条件各异，国外学者分别从成藏机理、成藏气源和成藏动力学角度，建立了相应的成藏地质模式，但这些模式仅仅强调了某一方面因素对成藏的影响，缺乏考虑多种地质作用及物理、化学因素对成藏作用的综合影响。我国学者也提出了扩散型和渗漏型两类概念型天然气水合物成藏模式^[6-7]。这些模式仍需要得到天然气水合物具体产出特征的检验。

应该说，是否有充足气体的供应是其中一个重要因素。理论和实验都证实，只有存在着充足气体供应时，即气体浓度大于其溶解度时，天然气水合物才能在其稳定带内产出。模拟结果显示，气体的充足供应是形成天然气水合物不可或缺的条件^[8-9]。除了烃类气体的供应条件外，从动态过程来考虑，控制天然气水合物的形成还涉及到其他一些因素，如烃类气体到达天然气水合物稳定带的途径 (原地供给或扩散或对流运移)、天然气水合物形成的条件和环境 (包括温压条件、构造因素、沉积环境) 等。研究形成天然气水合物所必需的气体供应源、气体怎样达到天然气水合物稳定带内、气体如何在天然气水合物稳定带内与水分子结合形成天然气水合物，是提高天然气水合物准确预测的一项重要工作。

过去以系统思想体现的含油气系统理论在石油和天然气勘查中得到了很好的应用效果。天然气水合物的组成以烃类气体为主，与常规油气的成藏过程在某些方面可能有一定的相似性，例如，它们必须存在着烃类的 (生成) 供应、烃类的 (长或短距离) 运移等。目前，研究天然气水合物的趋势是大力运用系统思想来开展天然气水合物气体供应、气体运移、天然气水合物聚集成藏之间的内在联系，即天然气水合物成藏系统研究 (Gas Hydrate Geological System)。虽然它与石油地质学中“含油气系统” (Petroleum System) 概念有些类似，但“天然气水合物成藏系统”是建立在天然气水合物形成过程自身特点基础上，与含油气系统仍然存在一些区别。油气地质上“含油气系统”最初是用来解释成熟烃源岩和油气藏之间的关系，是指一个动态的在一定地质空间和时间范围内起作用的石油生成和聚集的物理化学系统，包括油气生成、运移、聚集、再分配及散失过程，由成熟生烃岩、油气运移通道体系及相关的油气藏 (油气

圈闭)组成^[10]。而天然气水合物在自然界中的产出则不需要圈闭条件,只受温压条件的控制,当温压条件合适时烃类气体即可与水结合聚集成天然气水合物藏。科学家在文献中曾使用过“天然气水合物系统”(Gas Hydrate System)或“甲烷水合物系统”(Methane Hydrate System)或“天然气水合物油气系统”(Gas Hydrate Petroleum System)等^[4 11-12],但除 Xu等^[11]在文中指出“天然气水合物系统”是指由天然气水合物、游离甲烷气体、水+溶解甲烷组成的一个三相两组分动态系统外,大多数科学家均未对其给出一个明确的定义或说明,主要只指游离气体和水都存在的相平衡系统,或指深海环境甲烷氧化和硫酸盐还原等有机生态系统^[13],或指天然气水合物在温度和压力平衡条件下地质因素(主要是地层和流体发育体系)对其形成过程的约束^[4],或指对与“天然气水合物油气系统”有关的地质控制系统,或指流体运移构造系统等单一体系或过程。在过去天然气水合物研究中,未见有专门“天然气水合物成藏系统”方面的报道。

2 天然气水合物成藏系统的组成

天然气水合物成藏系统至少应该包括烃类生成体系(如烃类气体供应问题)、流体运移体系(如断裂通道及烃类运移问题)、成藏富集体系(如岩层和构造对天然气水合物产状与分布控制问题)。它们代表了天然气水合物从形成到保存的地质作用过程及地质要素的组合。

2.1 烃类气体生成体系

根据相图和前人研究,合适的地温梯度、底水温度、水深条件、气体组成、孔隙水盐度等是形成天然气水合物的基本要求。Xu等^[11]还认为,只有当溶于流体中的甲烷过饱和时(超过在海水中的溶解度)且甲烷流量超过其对应的甲烷扩散传输速率临界值时才能形成天然气水合物。虽然有时由于局部水分供应不足而未能形成天然气水合物^[14],但是,甲烷等烃类气体的供应是形成天然气水合物的关键。

在甲烷等烃类气体最初来源问题上,前人研究认为,它们要么由沉积物中有机质转化而来,抑或直接来源于深部的游离气,即一般认为,形成天然气水合物的甲烷等烃类气体主要有 2 种成因来源:一是生物成因,二是热解成因。此外,还有人认为形成天然气水合物的甲烷可能来自火

山热液流体^[15]。不过,实际中人们讨论更多的是生物成因或热解成因,并且习惯上将生物成因与原地提供相互等同,将热解成因与深部运移联系在一起。形成天然气水合物的烃类气体大多是这两种成因来源的混合,只是这些甲烷来源的相对重要性目前还不很清楚^[16]。

在布莱克脊和秘鲁大陆边缘区,天然气水合物稳定带内沉积物中总有机碳(TOC)平均含量均较高(1.5%和 3%),这些有机物质足以经原地转化成生物成因甲烷为形成天然气水合物所用,但是,许多证据表明,甲烷从微生物产气带进入天然气水合物稳定带(GHSZ)中存在着向上和侧向运移作用,如布莱克脊天然气水合物分布区^[17]。

在 Cascadia 大陆边缘区、日本南海海槽区和智利三联点区,天然气水合物稳定带内沉积物中总有机碳平均含量均较低(分别为 < 1%、约 0.5% 和 < 0.5%),显然由这些有机碳在原地转化为生物成因甲烷不足以形成天然气水合物,深部甲烷来源应是这些天然气水合物中甲烷的一种主要供应机制^[18]。

近年来,科学家还注意到天然气水合物与其下部的游离气藏或气体储集体或油气储集体等之间可能存在着联系^[4 16 19-23],如分别在 Cascadia “水合物海岭”区、秘鲁近海利马盆地、智利三联点区、墨西哥湾、挪威大陆边缘 Storegga 区、加拿大 Mackenzie 三角洲和阿拉斯加北坡等识别出天然气水合物稳定带下部存在过压力的游离气藏或气体储集体或油气储集体,这可能为天然气水合物研究提供一种新的思路。因此,浅部微生物成因来源和深部热解成因来源的烃类气体及其供应量构成了天然气水合物成藏系统的烃类生成体系。

2.2 多相流体运移体系

在布莱克脊区(Blake Ridge),过去一直认为天然气水合物中甲烷是有机质原地转化即生物成因来源,但最近通过对地震资料处理分析^[24-25]及模拟分析^[16 26]研究,认为该区存在着甲烷气体向上运移或毛细管作用。定量模拟结果显示,该区经沉积物压实驱动运移而来的甲烷占形成天然气水合物总量的 15% ~ 30%^[27]。在其他海域,如以生物成因气体组成的秘鲁大陆边缘天然气水合物区^[28],以热解成因气体组成的 Cascadia 大陆边缘“水合物海岭”区^[29]、墨西哥湾天然气水合物区^[30]、智利三联点(Chile Triple Junction)天然气水合物区^[31]、日本南海海槽(Nankai Trough)天然气

水合物区^[32]、挪威大陆边缘 Storegga 天然气水合物区^[4]等均存在着大量与天然气水合物形成有关的深部来源甲烷烃类气体的运移作用。M ilkov 等^[33]还在 Cascadia 大陆边缘“水合物海岭”区 BSR 之上和之下层位的沉积物中进行了甲烷含量的直接测量,结果显示在有烃类气体从深部增生复合体向海底运移的较小区域内,沉积物中甲烷含量高,天然气水合物和游离气含量均丰富;相反,在大片缺少该系统的区域内,沉积物中甲烷含量低,天然气水合物含量也较少,游离气几乎没有,这显示出气体运移在天然气水合物形成中的重要作用。可以说,不论是由微生物成因还是热解成因甲烷形成的天然气水合物大多存在着流体运移的供给,流体运移是天然气水合物形成过程中的一种普遍现象。

Fehn 等^[34]通过对与天然气水合物密切相关的孔隙水中碘含量及¹²⁹I 垂向分布规律示踪分析,认为不管是活动大陆边缘还是被动大陆边缘的天然气水合物,均存在着深部富含烃类气体(有机质)流体的向上运移作用,如主动大陆边缘区的加拿大外海“水合物海岭”区、秘鲁大陆边缘、日本南海海槽等,被动大陆边缘区的美国布莱克脊区、黑海、墨西哥湾等。这些地区的天然气水合物形成均与深部富含有机质生成的流体向上释放和运移作用有关,其中这些地区海底的泥火山即是流体释放的一种表征现象。虽然在被动大陆边缘区流体释放现象如海底泥火山等并不特别发育,但是地球化学调查结果显示同样存在着富含烃类气体流体运移过程^[17]。

其中,流体运移的通道在天然气水合物形成过程中发挥着关键作用,它们与天然气水合物形成过程密切相关。在已知的或推断的天然气水合物产区,根据其地质产状或地震资料特征均可清晰地辨别出这种流体运移通道体系。在布莱克脊天然气水合物区,地震剖面上观察到正断层或垂直通道^[25]穿越 BSR 现象,其周期性破裂可以为大量甲烷从深部储层向上运移提供一种主通道^[35-36]。Holbrook 等^[24]也认为该区凹陷周缘存在着甲烷逃逸断裂构造和侧向运移沉积构造。在 Cascadia 大陆边缘“水合物海岭”区,Hyndman 等^[18]和 Pecher 等^[21]在多年前就指出过气体运移通道为形成天然气水合物提供充足甲烷供应的重要性,Torres 等^[23]通过地震资料,在 BSR 到海底的整个天然气水合物稳定带中均观测到断层发育,

并用图示的形式解释了甲烷深部流体沿着断裂通道穿过 BSR 及天然气水合物稳定带一直通达海底等不同作用。T iéhu 等^[3]还在该区 ODP204 航次中发现一个特殊的地震反射层“A”,从 BSR 下方约 200 多 m 深处斜穿而上,根据其沉积物组成、测井数据和孔隙水锂离子含量特征及沉积物顶空气和保压取心样品分析结果,推测为一个把气体和流体从下伏增生体传送到水合物海岭峰脊的重要通道或“铅管”(p lumbing)运移体系。在秘鲁大陆边缘^[21]、墨西哥湾^[37]、挪威大陆边缘 Storegga 区^[4]、西南非洲大陆边缘^[38]等天然气水合物或 BSR 分布区,均直接观测到或在地震剖面上识别出大量的多边形断层系或“扫帚状”或“烟囱状”等构造,这些断裂系有的止于天然气水合物稳定带之下,有的则直接到达海底。可见,天然气水合物成藏体系的多相流体运移体系主要指携带烃类气体的多相流体在不同通道下的运移作用,包括它们的扩散运移和对流运移作用及各种流体的运移通道。

2.3 天然气水合物成藏富集体系

要形成天然气水合物藏还受到天然气水合物稳定带本身特性的制约。除温压条件外,岩性特征和构造条件是控制天然气水合物形成分布的两种主要因素^[3-25]。Lu 等^[39]通过实验表明,在砂质沉积物中天然气水合物的饱和度可达 79% ~ 100%,泥砂中可达到 15% ~ 40%,砂质粘土泥中只有 2% ~ 6%,这些结果与美国布莱克脊、日本南海海槽、加拿大 Mallk 天然气水合物样品中观察的结果一致。在实际中,Cascadia 大陆边缘“水合物海岭”区^[13]、挪威中部大陆边缘 Storegga 区^[4]等天然气水合物明显受岩性控制,主要充填于砂到砾沉积物孔隙中,而泥质沉积物如淤泥和粘土中不含天然气水合物,或天然气水合物含量低。其他地区情况也类似。此外,在自然界中,天然气水合物产出也明显受构造控制,它不仅受到断层几何特征的影响,而且还受到断层封闭程度的影响,例如,在 Cascadia 大陆边缘“水合物海岭”区,地震反射资料显示天然气水合物向“水合物海岭”的构造冠部集中^[20];在日本南海海槽^[31],天然气水合物均产于背斜的下部或冠部或断裂状翼部。在一些地区,沉积物岩性和微构造特征可以交叉作用共同控制天然气水合物的微观富集规律。苏新等^[40]在“水合物海岭”区研究天然气水合物的富集与其沉积物粒度关系时发现,天然气水合物

分布区沉积物在宏观上具有以粉砂为主(含量为 60% ~ 75%), 粘土一般小于 35%, 砂小于 5% 的基本特征, 但在微观上不同构造部位的沉积物粒径对天然气水合物分布具有不同的控制作用, 如其坡后盆地处于当地总体沉积物颗粒细, 天然气水合物则赋存在极细粉砂粒级(8~26 μm)沉积物中, 在“水合物海岭”南峰顶部附近处天然气水合物则主要赋存在粗粉砂和细砂(50~148 μm)中。当然, 对天然气水合物富集影响的岩性因素目前主要讨论的是其粒级的分布特征, 沉积组分如硅藻、有孔虫等含量变化特征对天然气水合物富集的影响还未见系统报道。对天然气水合物富集影响的构造因素其实也包括各种微构造如微裂隙、微断层等的作用。整体上, 可以说构造和岩性是天然气水合物产出的两个最主要影响因素, 它们和天然气水合物形成的基本温压条件共同构成了天然气水合物成藏富集体系。

3 典型区天然气水合物成藏系统初探

3.1 布莱克脊区

布莱克脊区处于北美东南部的被动大陆边缘, 是天然气水合物调查研究程度最高的地区之一。该区的天然气水合物在 DSDP76 航次(533 站位)和 ODP164 航次(994 站位、996 站位、997 站位)均采到了实物样品, 但更多的天然气水合物是由一系列间接指标测量结果所指示, 它们以小晶体状(533 站位和 994 站位)、薄片状(996 站位)、结核状(994 站位、996 站位、997 站位)、块状(997 站位)等方式产出, 主要产于海底以下 190~450 m 的沉积物内, 分布面积约 2.6~5.5 万 km^2 [41]。

甲烷是该区天然气水合物的主要烃类气体, 其碳、氢同位素特征显示大多数甲烷为微生物成因来源, 钻探揭示, 在钻孔钻遇最深处(海底以下 700 m), 微生物仍活跃, 但微生物数量随深度增加而明显减少, 表明绝大部分微生物成因甲烷很可能产于上部约 1 000 m 的沉积物中, 同时一些同位素数据也显示部分甲烷为热解成因, 它们来源于天然气水合物稳定带之下的沉积层 [41]。模拟结果显示, 997 站位天然气水合物中甲烷气体大约有 5% 来源于热解成因, 从物质平衡角度考虑, 布莱克脊区沉积物有机质含量平均约 1.4%, 据此计算的天然气水合物约占孔隙空间的 5%~6%, 这一数字只接近或略超过天然气水合物估算值的中一

低范围 [17], 并且碳测量值限定的是沉积物中未转化的 TOC, 而物质平衡计算依赖于对最终转化成甲烷那部分 TOC 数量的确定, 这一数值是未知的, 在计算中只是被认为转化值相当于初始 TOC 的 50% 或更低, 这样很可能还有其他运移来源烃类气体的加入。可以看出, 布莱克脊区天然气水合物的烃类气体以原地烃类供应为主, 同时还有深部运移烃类的供应, 它们共同构成了该区烃类生成体系。

证据表明, 这些烃类气体或多或少都经历了不同程度的运移作用, 即使是在天然气水合物稳定带之下, 沉积物仍可产生微生物气体, 这些甲烷气体从微生物产气带通过向上和侧向运移作用进入天然气水合物稳定带中。较高含量的天然气水合物产在天然气水合物稳定带底界附近, 这种现象既可用先期形成天然气水合物被深埋后分解释放的甲烷再循环机制来解释, 也可用甲烷向天然气水合物底界冠部运移机制来解释。实际上, 在天然气水合物稳定带之下存在着甲烷的运移作用。甲烷向上的运移作用很可能造成天然气水合物在地形高处含量较高, 同时也造成 BSR 产出在布莱克脊的冠部 [42]。通过绘制不同站位处的 SM I 深度, 发现浅的 SM I 深度刚好位于脊部或其附近, 表明地形或构造高位置的甲烷通量较高, 同时, 浅部沉积物中甲烷含量高, 甲烷梯度陡, 显示出烃类气体的运移特征 [17]。

调查和钻探显示, 该区多处深部发育有底辟, 它们源于中生代裂陷沉积, ODP164 航次在 991~993 站位处和 996 站位两处底辟上方的沉积物中实施了钻探, 显示它们很可能是盐底辟, 在 996 站位处沉积物孔隙水地球化学特征显示存在着对流运移 [43], 这些深部底辟作用可以形成大量烃类运移通道系。此外, 深拖地震资料显示该区存在着大量断裂 [35~36], 这些断裂本身就是一种重要的流体运移通道。同时各种流体运移通道常与微渗漏联系在一起, 例如 ODP164 航次 996 站位处海底即存在着活动性甲烷渗漏现象, 像世界上其他活动性甲烷渗漏一样, 该处见有麻坑、自生碳酸盐沉积、化能合成贝类、水柱中强声呐回声(被解释为甲烷气泡或浮游天然气水合物)等 [41], 该站位是深部盐底辟发育的地方, 很显然甲烷沿着脊部麻坑之下发育的一系列断裂向上运移 [44~45]。烃类的运移作用与各种通道系一起共同组成了该区天然气水合物的流体运移体系。其中, 甲烷流体运

移模式基本特征表现为：(1)孔隙水对流速度低；(2)以溶质扩散为主的运移发生在上部沉积物中(约 < 175 m)；(3)天然气水合物稳定带底界之下存在着游离甲烷气体；(4)布莱克脊的冠部甲烷流量大；(5)数字模拟显示要产生大量天然气水合物聚集必须有甲烷的对流供应。为此，Borowski^[17]认为上部沉积层(约 < 150 m)以扩散方式为主，下部沉积层则以游离甲烷对流运移为主要特征，这两种运移模式均叠加在低速孔隙流体运移基础上(约 20 cm/km)。

由天然气水合物烃类生成体系提供的烃类气体经流体运移体系传输至天然气水合物稳定带中，能否形成天然气水合物藏还需要成藏富集体系的匹配。钻探取样显示，布莱克脊区的部分块状天然气水合物很可能富集于断裂带内^[17]，在 996 站位，深部盐底辟及海底甲烷渗漏发育，同时该处浅部沉积物天然气水合物较丰富，整体上以薄层、晶片状产出在垂直或欠垂直的断裂里，这些天然气水合物很可能是当甲烷在断裂里向上运移时遇到合适的温压条件形成，或运移至近海底沉积物中形成海底出露的天然气水合物^[45]。这样，从天然气水合物分解而来的或从孔隙水中出溶的甲烷气体在沉积物运移，直至遇到不渗透层或者是渗透性差的沉积物，造成烃类气体聚集，构造和地层特征均控制着甲烷运移和富集^[42]，当这些烃类气体继续沿着流体通道向上或侧向运移至天然气水合物稳定带中，在有利空间内即可形成天然气水合物藏，它们彼此之间的内在联系共同构成一个天然气水合物成藏系统(图 1)。

应该说，图 1 中显示的甲烷向上扩散作用发生在整个区域，包括天然气水合物分布层和其之外的沉积层；部分甲烷可能沿着断裂运移至海底而逸散掉^[25]。在整个沉积层中，携带着甲烷的孔隙水对流运移作用也很强。在形成天然气水合物之前，当烃类气体浓度大于其在孔隙水中的溶解度时，可出溶形成甲烷气泡，然后在沉积层内或沿着沉积层的边界向上运移，且运移速度较快；在甲烷气泡进入天然气水合物稳定带内则可形成天然气水合物；随着时间推移，在天然气水合物稳定带底界，沉积物中的孔隙空间逐渐被天然气水合物充填，这样可造成一种渗透性屏障，使得甲烷气体进入天然气水合物稳定带的速度放慢或被阻止，在这些位置，甲烷气体容易聚集，以致于在地震剖面上出现 BSR；当然甲烷气体还可沿着倾斜的地层面或断裂进入天然气水合物稳定带内形成更多的天然气水合物。

3.2 “水合物海岭”区

“水合物海岭”区是一个长 25 km、宽 15 km 的增生脊，位于俄勒冈州外的聚合大陆边缘，沉积物由粉砂质、砂质浊积体组成；地形上由南峰、北峰及它们之间的鞍部组成；北峰所在的水深约 600 m，南峰水深约 800 m，它们的海底均见有大量气体渗漏现象或自生碳酸盐、天然气水合物、化能生物群落等产出^[23-46]，近些年 ODP146、ODP204、DDP311 航次在该区开展了大量有关天然气水合物的调查。

“水合物海岭”区的水深条件足以使得海底及其以下至 BSR 处(海底以下 115~ 135 m)均位于天

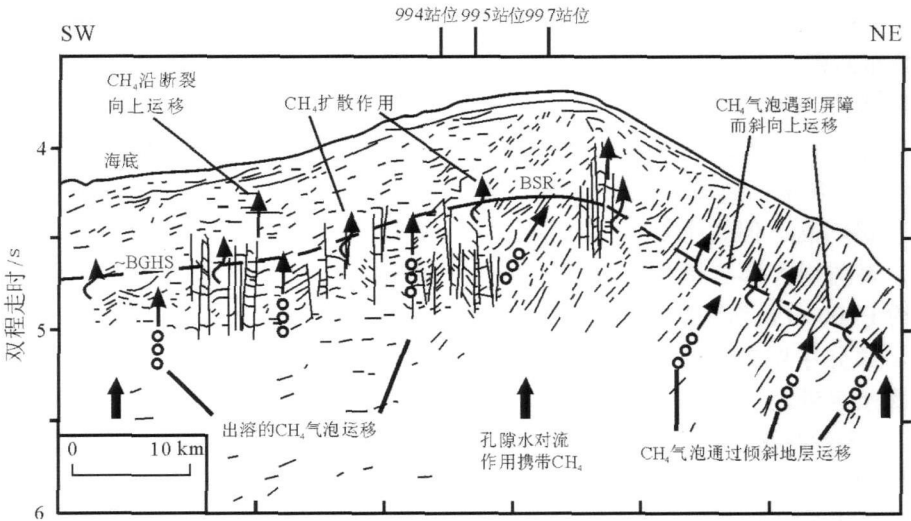


图 1 布莱克脊区天然气水合物成藏系统示意图(基于地震测线 USGS92- 12)^[17]

Fig 1 Sketch of gas hydrate geological system at the Blake Ridge(based on the seismic profile USGS92- 12)^[17]

然气水合物稳定带之内。各种替代指标显示, 天然气水合物既有直接产于海底表层沉积物中, 也有分布在海底以下至 BSR 层段之间的沉积物中; 其中, 块状天然气水合物透镜体在地形高处可以产于海底至其下约 30 m 之间的沉积物中; 总体上, 由随钻测量的电阻率剖面、热红外温度测量剖面、钻探取样结果揭示的天然气水合物在垂向上分布不均匀^[12]。

“水合物海岭”区天然气水合物的分子和同位素属性显示它们的气体有 2 种不同来源, 且按不同的比例混合而成, 一种是深部油气提供相对成熟的热解烃类气体, 另一种是微生物产生的烃类气体, 其中, 热解成因的烃类气体产自于深度可达 2~2.5 km 处, 它们在进入反射层“A”并沿着反射层“A”的运移过程中与其他微生物成因烃类气体发生混合^[12]。Lu 等^[47]对孔隙水中碘含量和¹²⁹I 同位素组成的分析表明, 大多数碘来源于深部始新世的增生沉积物, 还有少量晚中新世流体碘的补充, 由于碘和甲烷的强烈相关性及其流体运移参数的相似性, 表明形成天然气水合物的绝大部分甲烷也来自深部始新世的增生沉积物。因此, 该区天然气水合物的烃类生成体系主要由深部运移烃类气体提供, 同时还有原地微生物烃类气体的加入, 在局部地区则以原地微生物成因的烃类气体供应为主。

该区烃类气体的分子和同位素特征还显示, 烃类气体除了存在垂向运移作用外, 还存在侧向运移作用, 它们共同导致了天然气水合物在更大面积上的广泛分布^[12]。烃类气体的垂向运移现象的广泛发育, 以致海底可见大量向上冒出的气泡现象, 在天然气水合物稳定带内, 在离海底数十米之间的沉积中存在着大量游离的被天然气水合物封堵的烃类气体^[47]。在“水合物海岭”区地震剖面上存在着一系列特殊的构造层, 如反射层“A”、“B”、“B'”、“Y”、“Y'”、“AC”等, 它们实际上充当着烃类气体的流体运移通道, 甚至在天然气水合物稳定带中直接成为天然气水合物的富集空间, 它们的特征在 1245 站位、1247 站位、1248 站位和 1250 站位等钻探中得到了验证^[48]。此外, 反射层“A”的烃类气体地球化学结果显示, 沿着反射层“A”明显存在着流体运移特征, 重要的是, 在反射层“A”处还发现存在着溶解锂的异常, 这也是对流体沿着反射层“A”运移的一个重要证据; 反射层“B”和“B'”被广泛错断, 它们与活动的次

级背斜相关联, 同时这两个反射层源自代表增生复合体顶部的反射层“AC”, Triéhu 等^[3]认为反射层“B”和“B'”为 2 个可渗性地层面, 可将流体从增生复合体传输至天然气水合物稳定带中; 反射层“AC”见于增生复合体的顶部, 不同站位(如 1244 站位、1251 站位、1252 站位)岩心的孔隙水测量结果显示, 随着深度增加氯离子浓度减小, 锂离子浓度则增加^[3], 表明存在着淡水从增生复合体向上的运移作用, 反射层“AC”充当着一种重要的流体运移通道作用。

同时, 这些反射层由于本身的特殊构造和岩性特征^[48]也可成为天然气水合物的成藏空间, 例如, 在 1245 站位、1248 站位和 1250 站位, 钻孔岩心显示反射层“A”处为多个粗粒沉积层, 沉积物显微分析表明主要由相对新鲜的玻璃碎片组成, 显示出火山灰的特征; 在 1246 站位, 反射层“B”是由 2 组浊积岩组成, 天然气水合物即产在每组浊积岩层底部的粗粒层中; 在反射层“B'”中, 直接和间接标志也显示存在着天然气水合物; 反射层“Y”内含多个粗粒薄层浊积层。当然, 由烃类生成体系供给的烃类气体经过流体运移体系的不同作用之后, 在成藏富集体系(有利断裂空间和多孔的火山灰沉积等)的参与下, 在不同位置处的天然气水合物成藏产状会有所不同。

Triéhu 等^[49]进一步通过对“水合物海岭”区天然气水合物三维产状的研究, 认为天然气水合物在沉积物中的含量特征与不同级次断裂(系)的空间分布存在着较好的对应关系。在平面上, 天然气水合物含量最高的位置正好是“水合物海岭”区流体最活跃的脊部峰顶区域, 这些强烈的流体活动正好与其下的断裂或流体运移通道系统相互联系, 彼此在空间和成因上紧密相关。Milkov 等^[12]也指出, “水合物海岭”区南部峰脊处的高含量天然气水合物可能与烃类气体从深部向天然气水合物稳定带相对快速运移作用有关, 并总结出进入到天然气水合物稳定带内的气体流量、流体运移通道、微生物产气量最终共同控制着该区天然气水合物的分布与含量, 他们根据地质、地球物理、地球化学资料, 提出“水合物海岭”区南峰天然气水合物形成聚集的模式, 即来自深部增生复合体的热解成因和微生物成因混合游离烃类气体和溶解烃类气体沿着反射层“A”向上运移, 当烃类气体到达天然气水合物稳定带内便开始在沉积物孔隙空间形成天然气水合物, 此时含有天然气水合

物的沉积物渗透性下降;随着天然气水合物继续在其稳定带沉积物中聚集,从深部运移来的游离气体被上覆的天然气水合物和反射层“A”之上的渗透性较差的泥层覆盖阻挡而形成层状圈闭;当气柱达到某一最大高度,足以抵消其上覆泥质盖层和天然气水合物的封盖阻力,气体的持续供应将严重导致过压力,并且会降低泥质封盖层的有效应力;这样最终将促使烃类气体通过泥层孔隙和裂缝垂向泄漏至天然气水合物稳定带浅部;在浅部沉积物中,超过溶解度部分的烃类气体将转化为天然气水合物(图 2)。这种描述基本反映了该区天然气水合物成藏系统的特征,即天然气水合物大多形成于由相对浅部沉积物(实际上也在BSR之下的深度)中微生物产生的烃类气体和相对深部 2~2.5 km(很可能源自增生复合体)热解产生的烃类气体混合后形成;这种混合气体主要沿着反射层“A”运移至天然气水合物稳定带内;天然气水合物将优先在烃类流体运移通道内及周围形成。

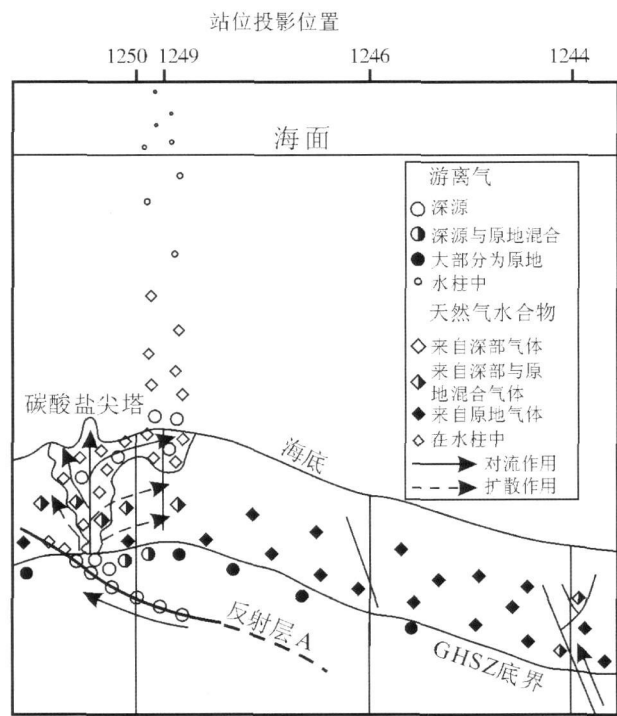


图 2 “水合物海岭”区天然气水合物成藏系统示意图^[12]
Fig. 2 Sketch of gas hydrate geological system at the Hydrate Ridge^[12]

3.3 墨西哥湾北部陆坡区

在墨西哥湾北部陆坡区,有 50 多处热解成因和生物成因的天然气水合物产地,水深在约 440 m 至大于 2 400 m 之间,既有结构 I 型微生物成因甲

烷水合物,也有热解成因的结构 II 型和 H 型天然气水合物,它们产在海底表层沉积物中或其下的较深层沉积物中,天然气水合物中所含的气体除甲烷外,还有乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷,甚至还含有异戊烷^[30-50]。显然,墨西哥湾北部陆坡区天然气水合物以深部运移烃类气体供应为主,并伴有浅部微生物烃类气体的混合,它们共同形成了该区天然气水合物的烃类生成体系。

墨西哥湾北部陆坡区断裂和盐底辟异常发育,各种微渗漏现象也很普遍,在空间上它们与天然气水合物的产出密切相关,各种浅部产出的热解成因天然气水合物及其他不同深度处生物成因天然气水合物,常与聚集着大量化能生物群落的油气微渗漏区交结在一起,同时由于该区各种微渗漏现象本质上是深部盐底辟及各种断裂系的综合外在表现形式,它还常与深部的天然气和油气田联系在一起^[19-51],如 Bush Hill 区 GC184/185 站位、GC234/235 站位、GC204/205 站位、Garden Banks 区 GB387/388 站位、Mississippi Canyon 区 MC798/842 站位、MC852/853 站位、A water Valley 区 AT425/426 站位等处。

墨西哥湾北部陆坡区天然气水合物常富集在构造地貌附近,如与盐底辟有关的断裂及盐收缩盆地的边缘,这些断裂或盆地边缘充当着流体从深部油气储集体向浅部运移的通道^[30]。烃类气体沿着断裂和各种微渗漏系及由盐底辟作用形成的各种通道系垂向和侧向运移即可构成天然气水合物的流体运移体系。同时,这些断裂和各种微渗漏系及由盐底辟作用形成的各种通道系,特别由盐底辟作用形成的各种微型盆地的边界空间有利于天然气水合物的赋存,它们构成该区天然气水合物成藏富集体系的主体。Whelan 等^[52]根据对墨西哥湾北部陆坡区等的观测,对该区各种微渗漏现象或作用及烃类气体运移与天然气水合物之间的关系进行了总结(图 3),其实就是对该区天然气水合物成藏系统的描述。在热解成因石油与深部烃类气体产生(图 3 左侧)和生物成因甲烷产生(图 3 右侧)并混合之后,两种来源的烃类气体均可通过断裂或裂隙快速向上运移,或者通过扩散方式比较慢地穿过沉积物,最终进入上部烃类聚集体中;当然,在上述两种烃类气体运移方式中,大多数烃类气体直接穿越了烃类聚集体,继续向上运移直至沉积物与海水的交界处;它们在合适的温压条件下就很容易形成天然气(甲烷)水合物

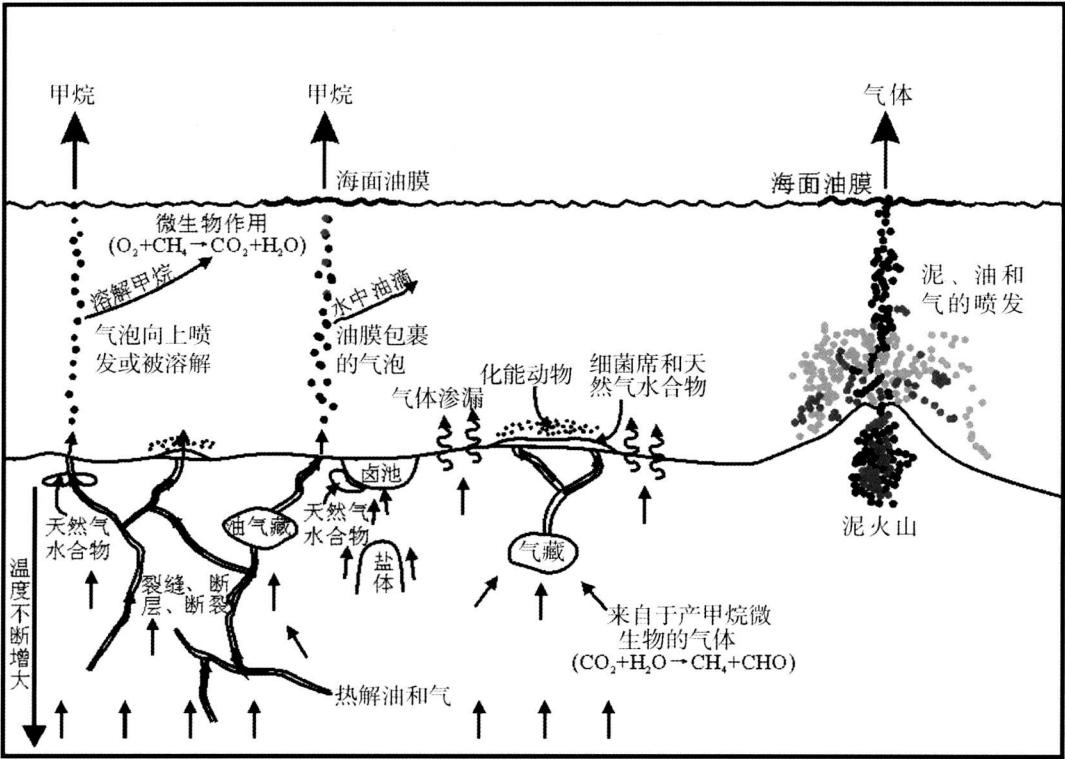


图 3 墨西哥湾北部陆坡区天然气水合物成藏系统示意图^[52]

Fig 3 Sketch of gas hydrate geological system at the northern Gulf of Mexico^[52]

并在有利聚集空间内沉积，或者烃类气体渗漏至上覆水体中；如果甲烷的浓度没有达到其饱和度，甲烷会以溶解态形式存在并且大部分会在水体中被生物降解掉；当甲烷的浓度比较高，就可形成气泡，如果在海底沉积物与海水界面以上 100 m 内甲烷仍以气泡形式存在，则甲烷可渗漏到大气中，在一些情况下，气泡常被油膜包裹；化能动物生物群落则趋于在天然气水合物表面及气体渗漏区附近的微生物菌席中聚集。

3.4 “Storegga滑塌体”区

Storegga滑塌体是世界上最大的海底滑坡区，该滑塌体范围从挪威西海岸一直延伸至冰岛南部^[4]。Bourlik等^[53]研究认为，Storegga的第二次滑坡(距今约 6~8 ka 造成了 1 700 km³ 的沉积物滑塌)是由天然气水合物分解所触发。虽然 Storegga滑坡无疑搅动了 Storegga天然气水合物系统，但是现有地质资料还不能确切回答 Storegga滑坡对该区天然气水合物造成了多大影响，该滑坡体北部分布的 BSR与海底平行，显示该区天然气水合物系统对滑坡后的沉积堆积作了适当调整，并且现在的天然气水合物分布不单是受滑坡前的沉积体和天然气水合物在滑坡过程中的差异消亡控制。

研究表明，在挪威外海 Storegga滑坡体天

然气水合物分布区，Naust组沉积物中有机碳含量较低，它不可能完全独立提供形成天然气水合物的所有烃类气体，因此肯定还有其他来源的烃类气体^[4]。一方面，从天然气水合物样品中所含的烃类气体成分中可以看出，它所含的烃类气体除了甲烷外，还有重烃^[54]；另一方面，天然气水合物分布区附近或深部的第三系穹隆结构，圈闭了烃类气体储集体^[55]，这种深部第三系穹隆结构的气藏最可能是其主要的气体来源，同时还很少有地质证据表明它们的甲烷气体产自其赋存的沉积物或先存天然气水合物的再循环^[4]。这两部分的烃类气体成因来源可能构成了该区天然气水合物的烃类生成体系。

前人研究还显示^[4]，滑坡体内 BSR的快速恢复、流体流动指标、浅部 BSR与深部第三系穹隆结构之间的一致性，以及 BSR的产出紧靠它们赋存沉积层系的底部，都可以推断天然气水合物与 BSR的形成依赖于深部流体的垂向运移；该区海底麻坑就是流体运移作用的另一种表现形式，是流体排出海底所致，它集中分布于 Storegga天然气水合物区对应导管的上部，在 BSR下部观测到的高振幅反射实际上为高含量气体造成，如果在天然气水合物层下出现持续的烃类气体和流体堆积，

下沉积物中的有机质在微生物作用下形成的烃类气体, 也可能来源于先期形成的天然气水合物分解释放的烃类气体。其流体运移体系和成藏富集体系特征虽然不很明显, 但该区最富集的天然气水合物除了分布在其稳定带底界附近层段外, 还发现赋存在断裂层段内, 表明流体运移体系和成藏富集体系对天然气水合物产状的控制作用。

在“水合物海岭”区, 天然气水合物的烃类气体显示以热解成因为主, 其烃类生成体系明显表现为深部供应, 烃类气体的目标来源还不清楚, 很可能与“AC”反射层之下的“穹隆”构造有关。其流体运移体系特征非常明显, 特别是流体运移通道, 即反射层“A”对流体运移的作用。该区流体运移体系与成藏富集体系的配合决定了天然气水合物的产出特征, 使得该区天然气水合物主要分布在峰脊部区域, 像“蘑菇”状。

墨西哥湾北部陆坡既是天然气水合物广泛分布的区域, 也是常规油气藏富集区, 该区天然气水合物成藏系统的烃类生成体系与深部油气储集体密切相关, 很可能由其储集体演化而成。该区盐底辟非常发育, 盐底辟作用形成的各种断裂为流体运移体系提供了重要通道。同时, 盐底辟形成的各种断裂及微型盆地边缘区是天然气水合物赋存的主要场所, 它们构成了天然气水合物成藏富集体系。

挪威近海“Storegga滑塌体”区天然气水合物过去普遍关心的是其分解引起的海底地质灾害问题, 实际上其天然气水合物成藏系统的烃类生成体系、流体运移体系、成藏富集体系三者关系对天然气水合物分布的控制作用非常明显。该区第三系“穹隆”被认为是天然气水合物烃类气体的主要来源, 构成了该区的烃类生成体系。连接该“穹隆”和浅部 Naust 组沉积层的网状断裂是流体携带烃类气体向上运移的重要通道, 它们构成了该区天然气水合物成藏系统的流体运移体系。网状断裂穿越的 Kai 组沉积层虽然部分处于天然气水合物稳定带内, 但由于其颗粒较细, 未见有天然气水合物产出, 类似地, 浅部冰成碎屑流沉积对流体运移的屏障作用也阻止了天然气水合物的产出, 它们均未能形成有效的天然气水合物成藏富集体系; 相反, 在 Naust 组处于天然气水合物稳定带底部及其与冰成碎屑流沉积结合的过渡区是天然气水合物富集场所, 它们的物性及温压条件形成了有效的天然气水合物成藏富集体系。

可以看出, 上述典型区天然气水合物成藏系统烃类生成体系、流体运移体系、成藏富集体系的三方面要素相互作用共同控制着天然气水合物的形成与分布。对上述典型区天然气水合物成藏系统的认识有助于加强对天然气水合物成藏地质过程的认识。近些年, 我国在南海海域投入了一定人力、物力和财力, 开展了一定程度的调查研究, 发现了许多指示天然气水合物存在的各种地质、地球物理和地球化学标识, 特别是去年在其东北部海域开展的天然气水合物专项钻探工程采集到了天然气水合物实物样品, 实现了天然气水合物勘查的历史性突破。但是南海天然气水合物资源的分布状况怎样, 如何在更大范围内认识天然气水合物资源产状和规模, 是当前乃至更长时期的一项艰巨任务。因此, 迫切需要新的勘探理论更好地指导南海天然气水合物的下一步勘探工作。加强该区天然气水合物成藏系统研究, 不仅对丰富天然气水合物地质成藏与勘查理论具有重要的科学探索意义, 而且还对本区天然气水合物野外调查与勘查实践具有重要的现实指导意义。可喜的是, 我国科学家已开始注意到天然气水合物成藏系统的重要性^[56], 并尝试着对神狐海域天然气水合物的成藏系统作了初步探讨。

参考文献:

- [1] Dickens G R. Rethinking the global carbon cycle with a large, dynamic and microbially mediated gas hydrate capacitor [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2003, 213: 169–183
- [2] Holbrook W S. Seismic studies of the Blake Ridge: implications for gas hydrate distribution, methane expulsion, and free gas dynamics [M] // Paul C K, Dillon W P. *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution and Detection*. Geophysical Monograph 124. Washington D C: American Geophysical Union, 2001: 235–256
- [3] Tóth A M, Bohrmann G, Rack F R, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports 204 [CDROM]. College Station, Texas: Texas A & M University (Ocean Drilling Program), 2003.
- [4] Bunz S, Mienert J, Berndt C. Geological controls on the Storegga gas hydrate system of the mid-Norwegian continental margin [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2003, 209: 291–307
- [5] 苏新. 海洋天然气水合物分布与“气-水-沉积物”动态体系——大洋钻探 204 航次调查初步结果的启示 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2004, 34(12): 1091–1099.
- [6] 陈多福, 苏正, 冯东, 等. 海底天然气渗漏系统水合物成藏过程及控制因素 [J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(3): 38

- 46
- [7] 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, 15(5): 524- 530
- [8] Lu Z, Sultan N. Empirical expressions for the gas hydrate stability law, its fraction and the layer density at temperatures 273- 15K to 290. 15K [J]. Geochemical Journal, 2008, 42 (2): 163- 175
- [9] 卢振权, Nabil Sultan 金春爽, 等. 天然气水合物形成条件与含量影响因素的半定量分析 [J]. 地球物理学报, 2008, 51 (2): 125- 132
- [10] 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集 [M]. 北京: 科学出版社, 1997: 364- 442
- [11] Xu W, Ruppel C. Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrate in porous marine sediments [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104 (B3): 5081- 5095
- [12] Milkov A V, Claypool G, Lee Y J et al. Gas hydrate systems at Hydrate Ridge offshore Oregon inferred from molecular and isotopic properties of hydrate-bound and void gases [J]. Geochemistry and Cosmochimica Acta, 2005, 69 (4): 1007- 1026
- [13] 吴能友, 王宏斌, 陆红锋, 等. 地质-生物系统中的甲烷研究——德国天然气水合物研究现状综述 [J]. 海洋地质动态, 2006, 22(5): 1- 7
- [14] Soloviev V A, Ginsburg G D. Water segregation in the course of gas hydrate formation and accumulation in submarine gas seepage fields [J]. Marine Geology, 1997, 137: 59- 68
- [15] 狄永军, 郭正府, 李凯明, 等. 天然气水合物成因探讨 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 138- 143
- [16] Davie M K, Buffett B A. Sources of methane for marine gas hydrate: inferences from a comparison of observations and numerical models [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 206: 51- 63
- [17] Borowski W S. A review of methane and gas hydrates in the dynamic, stratified system of the Blake Ridge region offshore southeastern North America [J]. Chemical Geology, 2004, 205: 311- 346
- [18] Hyndman R D, Davis E E. A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom-simulating reflectors by vertical fluid expulsion [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 7025- 7041
- [19] Sassen R, Losh S L, Cathles III 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
- [20] Torres M E, Walmann K, Trehu A M, et al. Gas hydrate growth, methane transport and chloride enrichment at the southern summit of Hydrate Ridge, Cascadia margin off Oregon [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 226: 225- 241
- [21] Pecher I A, Kukowski N, Huebscher C, et al. The link between bottom-simulating reflections and methane flux into the gas hydrate stability zone - new evidence from Lima Basin, Peru Margin [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 185: 343- 354
- [22] Mienert J, Bünz S, Guidard S, et al. Ocean bottom seismometer investigations in the Omen Lange area offshore mid-Norway provide evidence for shallow gas layers in subsurface sediments [J]. Marine and Petroleum Geology, 2005, 22 (1- 2): 287- 297
- [23] Torres M E, McManus J, Hammond D E, et al. Fluid and chemical fluxes in and out of sediments hosting methane hydrate deposits on Hydrate Ridge, OR, I Hydrological provinces [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 201: 525- 540
- [24] Holbrook W S, Lizarralde D, Pecher I A, et al. Escape of methane gas through sediment waves in a large methane hydrate province [J]. Geology, 2002, 30 (5): 467- 470
- [25] Gorman A R, Holbrook W S, Hombach M J, et al. Migration of methane gas through the hydrate stability zone in a low-flux hydrate province [J]. Geology, 2002, 30 (4): 327- 330
- [26] Flemings P B, Liu X, Winters W J. Critical pressure and multiphase flow in Blake Ridge gas hydrates [J]. Geology, 2003, 31 (12): 1057- 1060
- [27] Gering K L. Simulation of methane hydrate phenomena over geological timescales. Part I: Effect of sediment compaction rates on methane hydrate and free gas accumulations [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 206: 65- 81
- [28] Suess E, von Huene R, Emeis K, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Results, 112 [R]. College Station, Texas: Texas A & M University (Ocean Drilling Program), 1988
- [29] Tryon M D, Brown K M, Torres M E. Fluid and chemical fluxes in and out of sediments hosting methane hydrate deposits on Hydrate Ridge, OR, II Hydrological processes [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 201: 541- 557
- [30] Sassen R, Sweet S T, Milkov A V, et al. Geology and geochemistry of gas hydrates, central Gulf of Mexico continental slope [J]. Transactions of Gulf Coast Association of Geological Societies, 1999, 49: 462- 468
- [31] Behrmann J, Lewis S, Musgrave S, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Results, 141 [R]. College Station, Texas: Texas A & M University (Ocean Drilling Program), 1992
- [32] Taira A, Hill I, Firth J, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Report, 131 [R]. College Station, Texas: Texas A & M University (Ocean Drilling Program), 1991
- [33] Milkov A V, Claypool G E, Lee Y J, et al. In situ methane concentrations at Hydrate Ridge, offshore Oregon: New constraints on the global gas hydrate inventory from an active margin [J]. Geology, 2003, 31 (10): 833- 836
- [34] Fehn U, Snyder G T, Muramatsu Y. Iodine as a tracer of organic material: ¹²⁹I results from gas hydrate systems and forearc fluids [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2007, 95: 66- 80
- [35] Rowe M M, Gettrust J F. Faulted structure of the bottom-simulating reflector on the Blake Ridge, western North Atlantic [J]. Geology, 1993, 21: 833- 836
- [36] Rowe M M, Gettrust J F. Fine structure of methane hydrate-bearing sediments on the Blake Outer Ridge as determined from Deep

- Tow multichannel seismic data [J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98: 463–473.
- [37] Hutchinson D R, Ruppel C D, Pohlman J, et al. An integrated geological, geophysical, and geochemical analysis of subsurface gas hydrates in the northern Gulf of Mexico. AAPG Hedberg Research Conference: Natural Gas Hydrates: Energy Resource Potential and Associated Geological Hazards, September 12–16, 2004, Vancouver, B.C., Canada.
- [38] BerrAvraham Z, Smith G, Reshef M, et al. Gas hydrate and mud volcanoes on the southwest African continental margin off South Africa [J]. Geology, 2002, 30 (10): 927–930.
- [39] Lu H, Wright F, Okui T, et al. Sediment control on hydrate occurrence in natural sediments— from experimental results. AAPG Hedberg Research Conference: Natural Gas Hydrates: Energy Resource Potential and Associated Geological Hazards, September 12–16, 2004, Vancouver, B.C., Canada.
- [40] 苏新, 宋成兵, 方念乔. 东太平洋水合物海岭 BSR 以上沉积物粒度变化与气体水合物分布 [J]. 地学前缘, 2005, 12 (1): 234–242.
- [41] Paull C K, Matsumoto R. Leg 164 overview [M]. // Paull C K, Matsumoto R, Wallace P J, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. College Station, Texas: Texas A & M University (Ocean Drilling Program), 2000: 3–10.
- [42] Dillon W P, Paull C K. Marine gas hydrates. II. Geophysical evidence [M]. // Cox J L. Natural Gas Hydrates: Properties, Occurrence, and Recovery. Woburn, Massachusetts: Butterworth Publishers, 1983: 73–90.
- [43] Egeberg P K. Hydrates associated with fluid flow above salt diapirs (Site 996) [M]. // Paull C K, Matsumoto R, Wallace P J, et al. Gas Hydrate Sampling on the Blake Ridge and Carolina Rise. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 164. College Station, Texas: Texas A & M University (Ocean Drilling Program), 2000: 219–228.
- [44] 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: 789–790.
- [45] Van Dover C L, Aharon P, Bernhard J M, et al. Blake Ridge methane seeps: characterization of a soft sediment, chemosynthetically based ecosystem [J]. Deep-Sea Research, Part I, 2003, 50: 281–300.
- [46] Suess E, Torres M E, Bohmann G, et al. Gas hydrate destabilization: Enhanced dewatering, benthic material turnover and large methane plumes at the Cascadia convergent margin [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 170: 1–15.
- [47] Lu Z, Tomaru H, Fehn U. Iodine ages of pore waters at Hydrate Ridge (ODP Leg 204), Cascadia Margin: implications for sources of methane in gas hydrates [J]. Earth and Planetary Science Letters, doi: 10.1016/j.epsl.2007.12.015.
- [48] Shipboard Scientific Party. Leg 204 summary [M]. // Tóth A M, Bohmann G, Rack F R, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Results 204. College Station, Texas: Texas A & M University (Ocean Drilling Program), 2003: 1–75.
- [49] Tóth A M, Long P E, Torres M E, et al. Three-dimensional distribution of gas hydrate beneath southern Hydrate Ridge: constraints from ODP Leg 204 [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 222: 845–862.
- [50] Brooks J M, Cox H B, Bryant W R, et al. Association of gas hydrate and oil seepage in the Gulf of Mexico [J]. Organic Geochemistry, 1986, 10: 221–234.
- [51] Milkov A V, Sassen R. Preliminary assessment of resources and economic potential of individual gas hydrate accumulations in the Gulf of Mexico continental slope [J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20: 111–128.
- [52] Whelan J, Eglinton L, Cathles III L, et al. Surface and subsurface manifestations of gas movement through a N-S transect of the Gulf of Mexico [J]. Marine and Petroleum Geology, 2005, 22: 479–497.
- [53] Bourlák S, Volkonskaya A, Galaktionov V. ‘Split’ stratigraphically bound gas hydrate BSR below deposits of the Storegga Slide and at the southern edge of the Voring Plateau [J]. Marine Geology, 2003, 195: 301–318.
- [54] Andreassen K, Mienert J, Bryn P, et al. A double gas-hydrate-related bottom-simulating reflector at the Norwegian continental margin [J]. Annals of New York Academy of Sciences, 2000, 912: 126–135.
- [55] Dore A G, Lundin E R. Cenozoic compressional structures on the NE Atlantic margin: Nature, origin and potential significance for hydrocarbon exploration [J]. Petroleum Geoscience, 1996, 2: 299–311.
- [56] 吴能友, 张海敏, 杨胜雄, 等. 南海神狐海域天然气水合物成藏系统初探 [J]. 天然气工业, 2007, 27(9): 1–6.