

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.2019.0405

程聪,姜涛,匡增桂,等.天然气水合物系统特征及其对我国水合物勘查的启示[J].地质科技情报,2019,38(4):30-40.

天然气水合物系统特征及其对我国水合物勘查的启示

程 聪^{1a,1b}, 姜 涛^{1a,1b}, 匡增桂², 杨承志²

(1. 中国地质大学(武汉) a. 海洋学院; b. 构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074;

2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075)

摘 要:油气资源在能源结构中具有举足轻重的作用,其成因机制及勘探思路已发展出了完善的系统理论——含油气系统理论,而天然气水合物作为潜在替代清洁能源,其勘探理论尚处于探索阶段。借鉴含油气系统理论,注重与常规油气成藏的差异性分析,在系统分析全球已发现天然气水合物主要研究区的天然气水合物特征基础上,从气体来源、气体运移通道、有利储层等方面对天然气水合物成藏机理进行了系统梳理,以探究天然气水合物系统特征。提出天然气水合物系统应包括气源、储层和天然气水合物稳定带 3 个基本要素以及气体生成—运移过程和天然气水合物形成过程 2 个基本作用;冻土带内气体来源以热解气为主,海洋环境中则以生物气或热解气和生物气的混合气为主;气体运移通道主要为流体底辟、气烟囱、大尺度断层、裂缝、滑塌构造及高渗透性地层等;天然气水合物储层在冻土带以砂岩为主,在海域则以黏土质粉沙及粉沙质黏土为主;综合全球各区域天然气水合物成藏特征,提出了 9 种类型天然气水合物系统,同时以我国神狐海域天然气水合物系统为例总结出了天然气水合物系统成藏事件表。

关键词:天然气水合物系统;气源;运移通道;储层;成藏模式

中图分类号:P618.130.1 文献标志码:A 文章编号:1000-7849(2019)04-0030-11

Characteristics of Gas Hydrate System and Its Enlightenment to Gas Hydrate Exploration in China

Cheng Cong^{1a,1b}, Jiang Tao^{1a,1b}, Kuang Zenggui², Yang Chengzhi²

(1a. College of Marine Science and Technology; 1b. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510075, China)

Abstract: Oil and gas resources play an important role in the energy structure. The theory of Petroleum System, has been established for hydrocarbon genetic mechanism and exploration. For a potential alternative clean energy source, the exploration of gas hydrate is still in the exploratory stage. Drawing lessons from the theory of Petroleum System and focusing on the analysis of the differences between gas hydrate and conventional oil and gas, this study systematically analyses the characteristics of the main hydrate study areas in the world. Moreover, it systematically combs the mechanism of gas hydrate accumulation from the aspects of gas source, gas migration pathway and favorable reservoir, explores the characteristics of gas hydrate system. This study suggests that gas hydrate system should include three basic elements:

收稿日期: 2019-01-26 编辑: 史冠中

基金项目: 国家自然科学基金项目(41476032); 中国地质调查项目(DD20189310)

作者简介: 程 聪(1995—), 男, 现正攻读海洋科学专业博士学位, 主要从事海洋沉积学、天然气水合物等方面研究工作。

E-mail: chengc2017@foxmail.com

通信作者: 姜 涛(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋地质与资源等方面教学和科研工作。E-mail: taojiang@cug.edu.cn

gas source, reservoir and gas hydrate stability zone, as well as two basic functions: gas generation and migration and gas hydrate formation process. The gas sources in the permafrost zone are mainly thermogenic gas, while the gas sources in the marine environment are mainly biological or mixed gas. Gas migration pathways in hydrates include fluid diapirs, gas chimneys, large-scale faults, fractures, slump structures and high permeability formations, etc. The lithology of hydrate reservoir is mainly sandstone in permafrost zone, and clayey silt or silty clay in the marine environment. Finally, this study proposes 9 types of gas hydrate systems based on comprehensive characteristics of gas hydrate accumulation in various regions of the world, Taking gas hydrate system in the Shenhu area for example, the study summarizes accumulation events of gas hydrate system.

Key words: gas hydrate system; gas source; migration pathway; reservoir rock; accumulation model

天然气水合物(以下简称水合物)是由甲烷等相对分子质量较低的气体和水在低温高压条件下结合形成的、具有笼状结构的似冰状固态化合物^[1-2]。其形成的气体绝大多数都为甲烷,所以又称为甲烷水合物或可燃冰,存在于大陆冻土带和海洋环境中^[3]。水合物含有世界上绝大多数的甲烷,约占世界可移动有机碳含量的1/3^[3]。在常温常压环境下,一个单位体积的水合物分解可以释放出大约0.8个单位体积的水以及164~172个单位体积的甲烷气体^[1,4],因此水合物是一种资源潜力巨大的高效清洁能源,因此受到了许多国家的重视^[5-8]。

自Magoon等^[9]在传统油气勘探领域提出“含油气系统”理论后,Milkov等^[10]在对水合物脊区域的研究中首次使用了“天然气水合物系统”一词,从气体来源角度分析了该区域水合物的赋存状态,但并未进行详细的系统分析。此后有学者基于水合物气体生成、运移、聚集成藏3方面,提出了“天然气水合物成藏系统”^[5,11],对水合物成藏过程进行了初步探讨。Collett等^[12]也提出了包含水合物稳定的温压条件、气源、水源等在内的6个控制要素的“天然气水合物含油气系统”。这些研究为水合物勘查和评价提供了重要参考,但同时也将水合物研究分割成多个孤立要素,未进行系统的成藏分析;而“天然气水合物成藏体系”^[13]的研究,则从水合物的温压条件—气源—气体运移—有利储层方面进行分析。该概念的提出为水合物的勘查工作提供了极大帮助,但关于水合物成藏机理等方面尚存在一些亟待解决的问题。因此,笔者拟在系统分析和总结全球主要水合物研究区的气源、气体运移通道以及储层等特征基础上,借鉴“含油气系统”理论,注重水合物与常规油气成藏的差异性,阐述天然气水合物系统特征,并提出9种天然气水合物系统类型,以期对水合物的勘探和开发提供指导和借鉴。

1 天然气水合物系统

“含油气系统”是沉积盆地中生成和储集烃类流

体所必需的地质要素及作用,在时间和空间上有机联系的自然系统。它包含烃源岩、储集岩、盖层及上覆岩层4个基本要素,以及油气生成—运移—聚集成藏过程和圈闭形成过程2个基本作用^[9,14]。类比“含油气系统”理论^[12-13,15]，“天然气水合物系统”定义为与水合物气体生成、运移并聚集成藏有关所必需的地质要素和作用,在时间和空间上有机联系所形成的系统。其基本要素包括气源、储层以及水合物稳定带,基本作用包括气体生成—运移过程以及水合物形成过程2个基本作用。

水合物气体来源众多,既有甲烷、乙烷等同系物,也有二氧化碳、氮气等分子^[16],天然气水合物一般指甲烷水合物。甲烷可分为有机成因气和无机成因气,其中有机成因气又可分为生物成因气、热成因气以及混合成因气^[13,17]。根据水合物中烃类气体成分 R 值($R=C_1/(C_2+C_3)$)以及甲烷碳同位素 $\delta^{13}C_1$ 值可以有效判别气体成因^[18]。当 R 值大于1000且 $\delta^{13}C_1$ 在 $-90\% \sim -55\%$ 之间时,可以判定气源为生物成因;当 R 值小于100且 $\delta^{13}C_1$ 大于 -48% 时,可以判定气源为热成因;介于两者之间则为混合成因气。虽然有机成因气分布较为广泛,但是在世界上很多地方也发现了无机成因气的踪迹,且与火山活动关系密切^[19]。

水合物储层和传统油气储层有较大差异,除必须具有储集空间外,还需满足水源、水化学条件以及孔隙水盐度等其他要求。对于水源而言,形成I型水合物所需理想气水比为8:46,II型水合物则为24:136^[12]。海洋环境中,水源是较为充足的,但冻土地带可能会出现缺乏可利用水源的情况^[15]。为了直观理解水合物储层类型,Boswell等^[20]建立了水合物资源金字塔模型(图1)。从图1中可以看出,水合物储层主要包括4种类型:①以砂质为主的储集体。其主要为极地砂质储集体和海洋砂质储集体^[22]。砂质沉积物具有较高的孔隙度和渗透率,水合物能够赋存于孔隙中,较高的渗透率又能促进气体和水的流动,因此具有较大的开采前景。②含裂

缝的细粒储集体。一般以富黏土质沉积物为主。③海底水合物块体。含量较少,常存在于甲烷渗漏区附近^[23]。④非渗透性黏土质储集体。其分布较为广泛,开采难度较大。

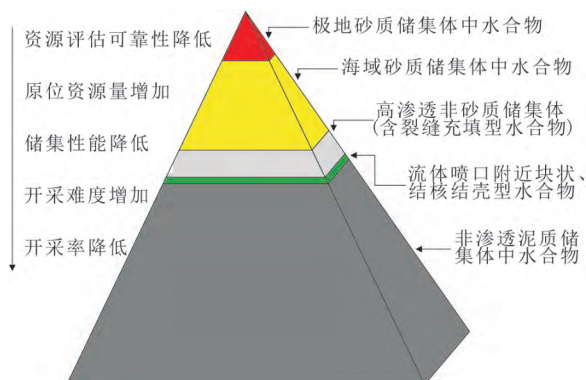


图1 水合物资源金字塔(据文献[20-21]修改)

Fig. 1 Gas hydrate resource pyramid

“天然气水合物系统”与“含油气系统”最明显的差异在于圈闭的形成。水合物只能在较为局限的温度和压力条件下形成,其稳定存在的区域被称为水合物稳定带^[3,24](图2)。在这一区域中,水合物可以稳定存在,相当于自成圈闭。

气体生成—运移过程是“天然气水合物系统”中的重要动态作用过程之一。气体生成主要依靠深部热降解作用以及浅部微生物作用,微生物作用又包括2种类型^[3,25]: CO_2 还原及乙酸发酵。其中乙酸发酵主要是原位微生物对有机质进行降解,进而形成甲烷; CO_2 还原则是微生物通过还原 CO_2 而产生甲烷。气体的迁移方式包含3种:游离气相扩散、水溶气相随流体迁移以及独立气相迁移^[26]。前人^[27-30]的大量研究已表明,甲烷可通过大陆边缘的增生楔、断裂褶皱、底辟构造、气烟囱、海底滑坡等输导通道运移至水合物稳定带中。

水合物形成过程则是深部及浅部气体运移至稳定带中成藏的过程。一般而言,当储层条件适宜、下部沉积物中的气体运移至水合物稳定带底界时就开始形成水合物(图3)。当气—水通量较低时,水合物稳定带中就会聚集形成低饱和度的薄层水合物(图3-A);当气—水通量相对较高时,稳定带中则会形成饱和度较高的厚层水合物,且其下部还聚集了游离气(图3-B);而当气—水通量较高并持续时,水合物稳定带底界会发生上移,水合物饱和度也随之增加(图3-C)。

“天然气水合物系统”是静态地质要素与动态作用过程在时间和空间上的有机结合,运用这一系统论对水合物勘查区进行分析能够有效建立水合物成藏模型,并指导水合物的勘探和开发。

2 全球天然气水合物系统特征

地球上大多数海洋和冻土带环境都具有形成水合物的条件。实际上,全球已有许多研究区取得了水合物实物样品,而且在俄罗斯索亚哈气田、美国阿拉斯加北坡冻土带、加拿大波弗特海—麦肯齐三角洲盆地、日本南海海槽以及中国南海神狐海域已经进行了水合物试开采(图4)。

2.1 中国南海神狐海域

神狐海域位于中国南海北部陆坡区,构造上隶属于珠江口盆地白云凹陷^[33],是世界上为数不多的已经进行了水合物试开采的区域。何家雄等^[34]、吴能友等^[35]通过对神狐海域甲烷碳同位素分析认为,水合物 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-74.3\text{‰} \sim -46.2\text{‰}$,甲烷属于生物成因气和亚生物成因气。张伟等^[36]认为神狐海域气源丰富多样,深部热成因气通过输导系统向上运移,进而和原位生物成因气结合,形成混合成因气体。龚跃华等^[37]、Yu等^[38]认为神狐海域内断层和底辟是流体运移通道,滑塌构造的形成能够在局部

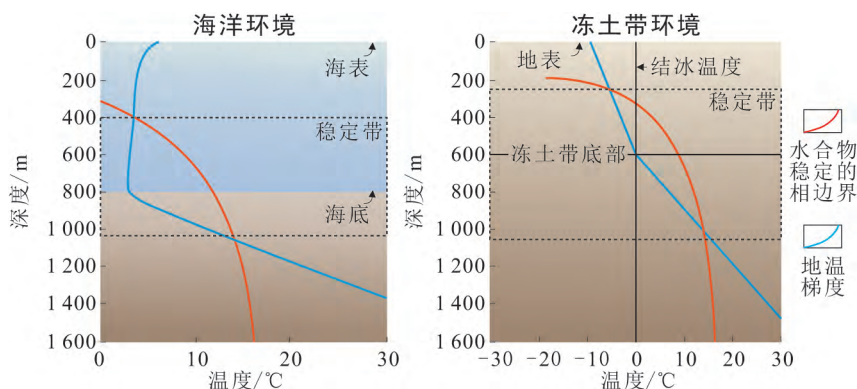


图2 水合物的稳定条件(据文献[3,24]修改)

Fig. 2 Stability conditions for gas hydrate

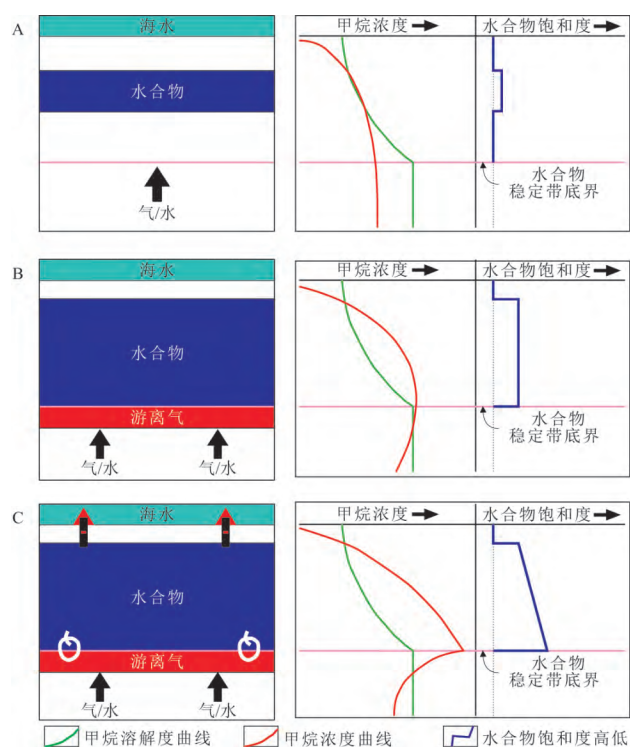


图3 水合物形成过程图解(据文献[12]修改)

Fig. 3 Diagram of gas hydrate forming process

产生高孔渗带,形成良好储集层。进一步研究表明底辟构造和断裂体系在此区域较为发育^[30,39],水合物储层主要为粉沙质黏土、含粉沙黏土及黏土质粉沙,沉积物颗粒较细。沉积物中含有大量有孔虫,增大了颗粒磨圆度,有利于水合物的赋存^[36]。何家雄等^[40]从多个方面对水合物成藏模式进行了总结,并基于气体来源角度提出了微生物作用“它源扩散型”自生自储原地成藏模式以及热降解作用“它源渗漏型”下生上储异地成藏模式。深部热成因气可经沟源断层、底辟构造等通道运移至稳定带中;浅部生物成因气则主要通过扩散作用迁移至稳定带中形成水合物。

2.2 中国祁连山木里冻土带

木里冻土带地处青藏高原东北部,位于大通河盆地内^[41]。文怀军等^[41]对19个岩心样品的气源分析认为,研究区内气源相差较大,生物气、热解气、混合气以及煤成气均有发现,水合物气源以热解气为主。研究区经历了多期构造运动,形成了大量的逆冲断层^[41],断层在深部角度较缓,有利于气体的运移,对水合物的形成起促进作用。木里地区储层岩性主要是孔渗性较低的泥岩、粉砂岩^[42],不仅可见充填于沉积物孔隙空间中的水合物,也可见以块状、

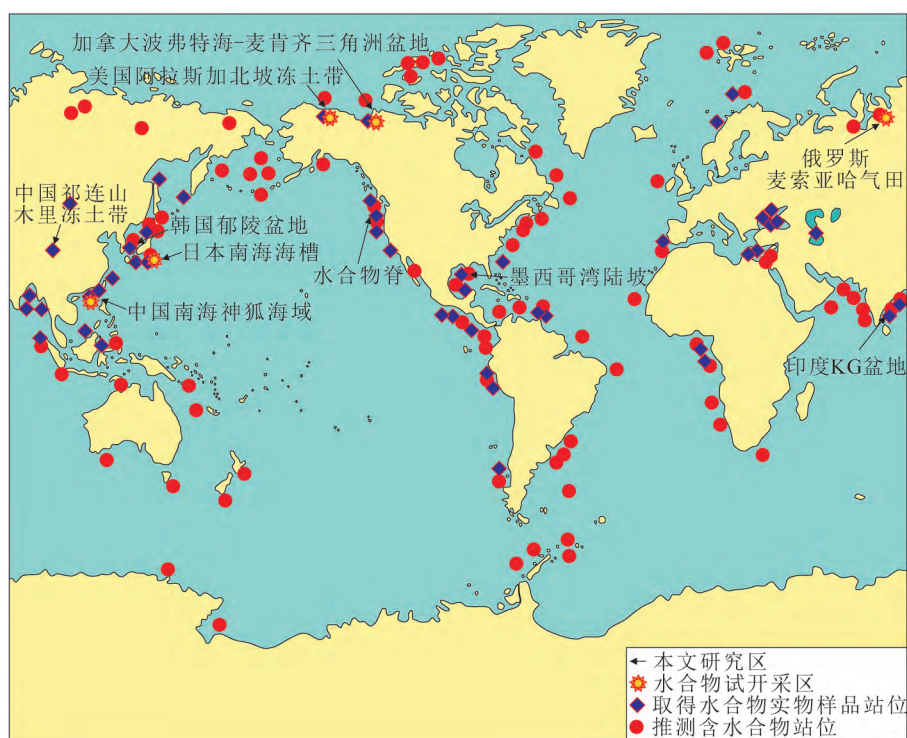


图4 全球水合物分布范围(据文献[12,31-32]修改)

Fig. 4 Global distribution of gas hydrate

颗粒状等夹于岩层或裂缝中的水合物^[43]。该区水合物主要是深部地层所产生的热成因气,经大尺度逆冲断层向上运移至稳定带中形成。虽然这是世界

上第一个在大陆中低纬度冻土带发现水合物的区域,但李永红等^[44]估算认为,木里地区的水合物储量较小,并不具备商业开采价值。

2.3 阿拉斯加北坡冻土带

阿拉斯加北坡位于美国阿拉斯加州,包含布鲁克斯山脉以北至波弗特海沿岸的近海区域。Collett 等^[12,45]通过对阿拉斯加冻土带钻井分析发现,水合物聚集区内的甲烷是生物成因和热成因混合气体,而且热成因气体来自于普拉德霍湾等油田的深部。Inks 等^[46]认为断层应该是气体运移并聚集成水合物藏的重要影响因素。断层成为从深部地层到浅部含水合物层的气体运移通道,游离气可通过这一通道从气源区向上运移至水合物稳定带,并在适宜条件下形成水合物矿藏。该区水合物储层岩性以砂岩为主^[12],因为储集条件较为优越,水合物饱和度可达 60% 以上,最高为 75%。鉴于阿拉斯加北坡冻土带的水合物饱和度较高,已成为全球勘探开发水合物的热点地区之一。

2.4 墨西哥湾陆坡

墨西哥湾位于北美洲大陆东南沿海海域,油气资源丰富,是全球海域水合物发育的典型地区之一^[47]。Ginsburg 等^[48]早在 1997 年就认为墨西哥湾的水合物有热解气的踪迹,而且 Brooks 等^[49]在这一区域的海底观察到了与水合物有关的游离气的释放。在墨西哥湾北部,除了热成因气之外,由于较高的有机碳含量和沉积速率,生物成因气也不容忽视,且已在稳定带浅部发现了生物气的踪迹^[50]。Hutchinson 等^[51]在地震剖面上识别出了大量亮点和疑似气烟囱构造,Cook 等^[52]认为气体可以通过断层、裂缝以及其他一些高渗透性运移通道进入到水合物稳定带中甚至穿过水合物稳定带。通过对测井—钻井—岩心资料的分析表明,墨西哥湾水合物储层包括盆底扇沉积的多个砂体,小尺度的浊积水道、深水水道系统中薄层的砂岩夹泥岩等细粒沉积物,这一区域内某些层段水合物储层孔隙度达到 40%,水合物饱和度平均高达 80%^[53]。

2.5 水合物脊

水合物脊,又称水合物海岭,位于美国俄勒冈州西海岸近海的卡斯凯迪亚大陆边缘。Heeschen 等^[54]对水合物脊海底冷泉喷口的甲烷气源研究表明,水合物脊南北峰的喷口处甲烷一般都为生物成因, $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-66\text{‰} \sim -63\text{‰}$ 。Tréhu 等^[55]发现水合物脊南峰附近的似海底反射(BSR)之下存在着纵向和横向多维运移通道,气体在 BSR 之下的一套渗透率较高的地层中聚集。当地层压力较高时可促使气体发生垂向运移,形成地震反射特征为弱振幅的气烟囱,并可观察到气烟囱冲破 BSR^[56-57],在其之上聚集形成水合物甚至运移至海底形成丘状体。苏新等^[58]通过对 ODP204 航次 8 个站位沉积物粒度分析发现,水合物稳定带内岩性以黏土质粉沙、粉沙

质黏土夹含沙质粉沙、含沙质黏土为主。水合物脊附近水合物主要是浅部形成的生物气,经气烟囱等垂向输导通道运移至水合物稳定带中形成的。大量海底冷泉的发现又说明此区域甲烷通量较大,但生物成因甲烷何以形成众多的冷泉还有待进一步研究。

2.6 日本南海海槽

南海海槽位于日本东南部,从东海近海至九州近海,面积约 700 km^2 ,深度约 4 km 。Tsunogai 等^[59]、Colwell 等^[60]对日本南海海槽近海底沉积物样品的分析表明,甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 小于 -90‰ ,并且 $\text{C}_1/(\text{C}_1+\text{C}_2)$ 大于 1 000,说明气体来源以生物成因为主。日本南海海槽东部构造活动强烈,在熊野弧前盆地可识别出大量高角度正断层,与第四纪地层甚至海底相连^[61]。不仅如此,地震资料解释还表明该区有许多泥火山发育。泥火山刺穿 BSR,成为深部流体垂向运移的通道^[62-64]。日本南海海槽附近的水合物发育于深海扇浊流沉积体系,充填于沙质沉积物孔隙中^[21]。浊流沉积体系对水合物的形成是非常有利的,沙质沉积物中充足的孔隙空间,为水合物的赋存提供了必要条件,大多数钻井表明含水合物层孔隙度一般在 $40\% \sim 45\%$ 之间^[65]。

2.7 加拿大波弗特海—麦肯齐三角洲盆地

波弗特海—麦肯齐三角洲盆地位于加拿大西北部,地处北极冻土环境。Dallimore 等^[66]、Majorowicz 等^[67-68]在马里克水合物勘探区识别出了生物成因和热成因 2 种类型气体来源。研究表明其岩心样品 $\delta^{13}\text{C}_1$ 平均值为 -42.7‰ ,说明水合物气体来源以热解气为主。对这一区域的油气勘探研究表明,断层为深部烃类气体的垂向运移提供了输导通道^[68]。Lane 等^[69]通过对波弗特海—麦肯齐三角洲盆地尺度的构造运动研究,刻画出了多个断裂带。这些断裂系统不仅可以作为输导体系,同时也成为水合物的储集空间。深部烃源岩所产生的热解气,很有可能是通过大尺度犁式正断层向上运移至水合物稳定带^[67]。对研究区钻井的分析表明,水合物一般充填于分选较好的砂岩孔隙中,同时饱和度与砂质含量呈现出正相关关系^[70]。

2.8 韩国郁陵盆地

郁陵盆地位于韩国东海岸外的东海(日本海)西南部,盆地东北部有少量火山活动形成的海山。UBGH1 航次岩心样品的甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-78\text{‰} \sim -75\text{‰}$,以生物成因气为主^[71],生物成因气多通过 CO_2 还原而来。地震剖面上可见大范围分布的振幅空白带、强振幅带以及数量众多的气烟囱构造,并且有一些与高角度断层或裂缝相连。这些气烟囱构造大多以窄柱状存在,且终止于水合物稳定带内或海底处。Dong 等^[72]认为气体运移通道

除了垂向的气烟囱、断层裂缝系统之外,另外还包括横向的高渗透性浊流、半远洋沉积物地层。UBGH1航次证实水合物可以存在于薄层的粗粒粉砂岩、砂岩或火山灰层中。这些薄层砂岩很有可能是浊流沉积所形成,依靠重力流从陆架区域搬运而来。UBGH2航次在砂质沉积物中发现了孔隙充填型的高饱和度水合物,在细粒沉积物中发现了裂缝充填型水合物^[73],裂缝充填型的岩性以砂岩为主,孔隙充填型则以粉砂岩为主^[74-75]。

2.9 印度克里希纳—戈达瓦里盆地

克里希纳—戈达瓦里盆地位于印度东海岸中部,印度于2006年开展了水合物第一次钻探航次(NGHP-01),在KG盆地选取了15个站位进行了水合物钻探。该区内水合物中的气体基本上都为生物成因甲烷,另外含有少量生物成因乙烷^[76]。 $\delta^{13}\text{C}_1$ 平均值为 -67‰ ,表明KG盆地浅层气体为生物成因^[77]。诸如气烟囱、泥底辟、海底麻坑之类的流体运移通道在盆地内较为常见,可见疑似底辟构造刺穿地层现象,被认为是异常压力释放所致^[78]。地震剖面显示有大尺度正断层连接了深部与浅部地层,这些断层既有构造成因,也有因浅部地层失稳滑塌形成^[79]。岩心分析表明,该区内沉积物中粗粒物质体积分数较小,粉沙体积分数大约为23%,黏土体积分数则高达72%~82%,岩心孔隙度可达55%~60%^[78]。

KG盆地、郁陵盆地的天然气水合物成藏特征较之我国南海神狐海域有许多相似点,其中生物成因气占据主导地位,地震剖面均可识别出众多底辟、气烟囱构造等,而且储层也多为细粒沉积物。因此,在下一步工作中,可将三者进行区域性对比研究。

2.10 俄罗斯麦索亚哈气田

麦索亚哈气田是世界上唯一进行了天然气水合物工业开采的气田,位于高纬度冻土带区域,其面积约为237 km²,冻土带厚度在420~480 m之间。麦索亚哈气田所生产的天然气属于热成因气,储层为白垩系砂岩^[80]。含水合物层厚度约为75 m,饱和度约为20%,平均孔隙度为25%^[81],平均渗透率为 $125 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[80]。截止2005年1月,麦索亚哈气田的天然气大约有55%都来自于水合物^[81]。麦索亚哈气田之所以成为水合物唯一商业开采的特例,主要有两方面的原因:一是水合物藏位于稳定带边界附近,温压条件的改变即可造成水合物的分解,形成大量甲烷气体;二是水合物藏下部还有大量的游离气,开采游离气可降低水合物藏压力从而造成水合物分解^[82]。

综上所述,全球各大陆边缘及永久冻土带内均有水合物发育,且其附近多有常规油气发现。水合

物的研究可类比于常规油气,分析其异同点,不仅要关注影响水合物形成的各个关键因素,而且需要将这些因素有机耦合成为一个整体,形成研究水合物成藏机理的系统方法。

3 天然气水合物系统特征

全球水合物分布特征表明,水合物成藏具有明显规律性。运用天然气水合物系统理论能够有效地认识和理解水合物成藏过程,并对水合物勘查具有一定指导作用。

3.1 气源

水合物主要分布于冻土带及海洋环境中(表1)。在永久冻土带,其气体来源均有热解气,一般也会有生物成因气的踪迹。如木里冻土带、麦肯齐三角洲以及麦索亚哈气田等冻土带地区均以热解气为主,阿拉斯加北坡则以混合气为主。而在海洋环境中,大多数地区呈现出生物成因气或混合成因气主导的特征,有学者认为浅部有机质足以产生形成水合物藏的甲烷^[25,34,83],也有学者认为生物成因气不足以形成大量的甲烷^[84-85]。鉴于现阶段对于甲烷成因的判别方法主要依赖于R值($R = \text{C}_1 / (\text{C}_2 + \text{C}_3)$)及甲烷碳同位素值^[18],尚未考虑是否存在甲烷碳同位素值被改造的情况。因此,也可能存在深部地层有机质经热降解作用形成甲烷,而后运移至浅部又经过微生物作用改造,从而导致其甲烷碳同位素值呈现出微生物成因特征。

3.2 气体生成—运移过程

甲烷气体主要有3种来源,分别是深部有机质经热降解作用、浅部有机质经微生物降解作用以及微生物还原CO₂作用而产生。海洋环境中,气体来源以生物成因气为主,热解气相对较少,这与海洋环境中黏土、泥质等含量较高,微生物分布广泛有密切关系,如韩国郁陵盆地生物成因气主要为CO₂还原类型^[83,86]。

气体运移通道则多种多样,以底辟、气烟囱、断层、裂缝、滑塌构造以及高渗透性地层为主。冻土地带深大断裂作为主要的运移通道,同时在产生热解气的海域大多都有大尺度断层以及底辟或气烟囱的发育,这也说明深部大量热解气是可以通过垂向输导体系统运移至水合物稳定带中并形成水合物的。

3.3 储层

海域水合物储层孔隙度都相对较高,但渗透率基本都小于数个毫平方微米。储层多为粉沙质黏土及黏土质粉沙等。虽然储层粒度较细,但水合物饱和度却较高,储层类型也多为含裂缝细粒储集体。在墨西哥湾,水合物脊也有海底丘状体的发育。冻土带地区水合物储层岩性多为砂岩,木里冻土地带

表 1 全球水合物分布及特征
Table 1 Characteristics of gas hydrate around the world

类别	神狐海域 ^[50,54-60]	祁连山木里冻土带 ^[41-44]	阿拉斯加北坡 ^[12,45-46]	墨西哥湾 ^[46-53]	南海海槽 ^[21,59-65]	波弗特海-三角洲盆地 ^[55-70,87]	郁陵盆地 ^[71-75]	KG 盆地 ^[76-79]	麦索亚哈气田 ^[80-82]
研究区域	海域陆坡区	中低纬度冻土带	极地冻土带	海域陆坡区	海域	极地冻土带	海域	海域	极地冻土带
气源	$\phi(\text{CH}_4) > 99.0\%$; $\phi(\text{CH}_4) > 96.0\%$; 生物气、混合气、热解气、生物气、煤系气均有发现, 以热解气为主 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 -74.3% ~ -46.2% ; 生物气、煤系气均有发现, 以热解气为主 $\phi(\text{CH}_4)$ 为 99.0% ~ 99.5% ; $\delta^{13}\text{C}_1$ 平均值为 -42.7% ; 生物气、热解气均有发现, 以热解气为主 UBGH1 航次: $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 -78.0% ~ -75.0% ; UBGH2 航次: $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 -60.8% ; 以生物气为主								
运移通道	底辟、气烟囱、大尺度断层、滑塌构造	大尺度断层、碎带	大尺度断层	气烟囱、大尺度断层、裂缝	断裂系统、气烟囱、高渗透性地层	高度正断层、泥火山	气烟囱、高角度断层、裂缝、高渗透性地层	气烟囱、泥底辟、海底麻坑、断层、裂缝、滑塌构造	/
水合物饱和度/%	最高为 64.0, 平均为 46.2	/	最高为 75, 平均在 60 以上	细粒沉积物中平均为 10, 砂岩中平均可达 80	砂质沉积物中平均为 60~80	最高为 80, 平均为 25~50	UBGH1 航次: 70~90; UBGH2 航次: 30~95	约为 25	约为 20
储层孔隙度/%	平均为 30.0	平均为 3.69	平均在 35 以上	砂岩中为 30~40	40~45	25~48	UBGH1 航次: 50~70; UBGH2 航次: 65~71	55~60	16~38, 平均为 25
储层渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	平均为 5.5	约为 1.25	最高为 20 000, 平均可达 3 000	/	0.03~0.15	/	0.001~0.1	/	平均为 125
储层岩性	粉砂质黏土、含粉砂黏土	泥岩、粉砂岩	砂岩	火山碎屑砂岩、浊积水道砂岩、砂岩、夹泥岩等细粒沉积物	粉砂质砂、黏土质粉砂等	砂岩、砾岩含量较高	黏土质粉砂岩、砂质粉砂岩、粉砂岩等	粉砂质黏土、黏土体积分数可达 72%~82%	砂岩
水合物产出状态	浸染状、孔隙充填、脉状、结核状等	块状、浸染状、充填等	孔隙充填等	孔隙充填、裂缝充填等、海底丘状体等	浸染状、海底丘状体等	孔隙充填	孔隙充填、裂缝充填、浸染状、块状充填	孔隙充填、裂缝充填	孔隙充填
储层类型	含裂缝细粒储集体、非渗透性黏土体	含裂缝细粒储集体、非渗透性黏土体	极地砂质储集体	海域砂质储集体、含裂缝细粒储集体、海底水合物丘状体、海底水合物丘状体	含裂缝细粒储集体、非渗透性黏土质储集体	极地砂质储集体	含裂缝细粒储集体、非渗透性黏土质储集体	含裂缝细粒储集体、非渗透性黏土质储集体	极地砂质储集体

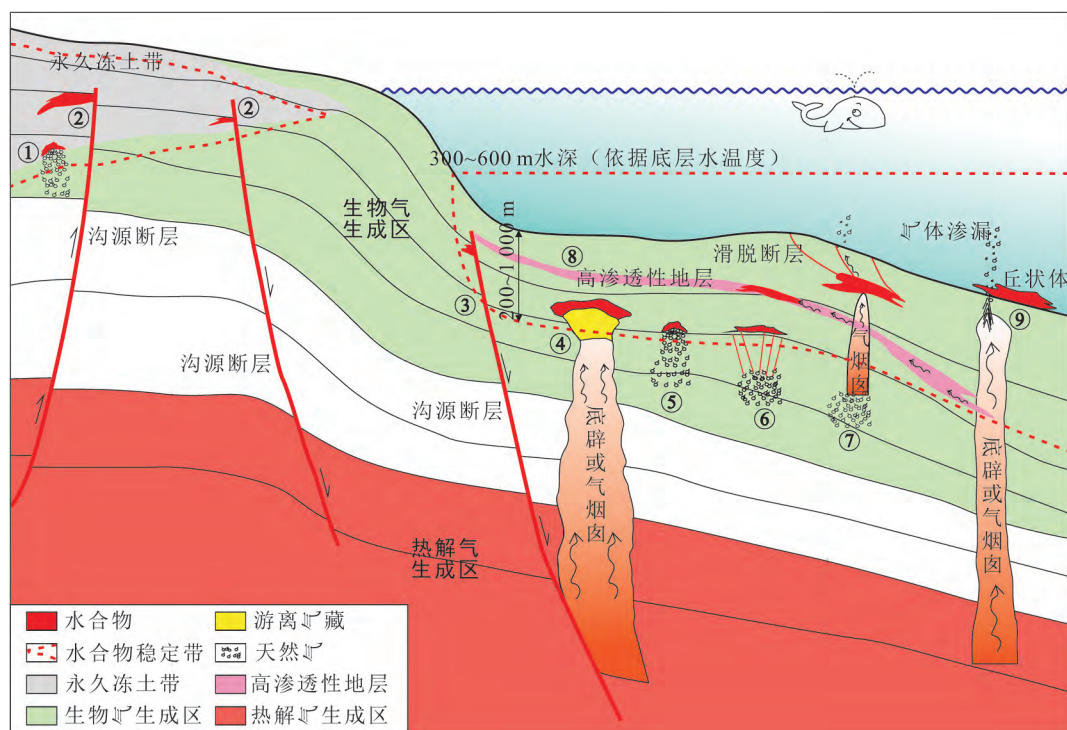
处中低纬度地区,岩性则以泥岩、粉砂岩为主。极地砂质沉积物渗透率都比较高,孔隙度也都极好,储层类型也主要为砂质储集体,是开采难度最小、资源潜力最大的一类。

3.4 天然气水合物系统类型

对全球主要研究区内天然气水合物系统特征的分析表明,海洋环境与冻土带内水合物成藏模式差异较为明显。在前人^[3,13]研究基础上,综合考虑水合物气体来源类型、运移通道类型及储层类型等主

控因素,并根据全球各主要研究区内水合物特征(表1),系统总结并提出了9种永久冻土带和海域环境的天然气水合物系统类型。如图5所示,水合物形成的充分必要条件包括充足的气源、有效的输导通道、合适的稳定域以及这些要素的良好时空耦合关系。这9种简单的天然气水合物系统类型在全球主要研究区内均有发现,特殊条件下,几种类型组合在一起,还会形成复杂的天然气水合物系统。

按此天然气水合物系统理论,可以用天然气水



①生物气—扩散作用—冻土带黏土系统(木里冻土带);②热解气—沟源断层—冻土带砂质沉积物系统(阿拉斯加北坡);③热解气—沟源断层—海域黏土系统(水合物脊);④热解气—底辟—海域黏土系统(神狐海域);⑤生物气—扩散作用—海域黏土系统(神狐海域);⑥生物气—断层裂缝—海域黏土系统(神狐海域);⑦生物气—气烟囱—海域黏土系统(神狐海域);⑧热解气—底辟或高渗透性地层—海域沙质沉积物系统(墨西哥湾);⑨热解气—底辟或渗漏通道—海底丘状体系统(墨西哥湾)

图5 永久冻土带及海域天然气水合物系统类型

Fig. 5 Types of gas hydrate system in permafrost zone and sea area

合物系统成藏事件表来表示水合物形成所必需的、各地质要素的有机结合。以我国南海神狐海域水合物研究为例^[34,36],此区域内水合物气体来源丰富,生物成因气、热成因气及混合成因气均有发现。现今勘探结果表明生物成因气占主导地位,热成因气源岩则以文昌组、恩平组地层为主。水合物储层主要为第四纪地层,沉积物颗粒较细,同时基于研究区地震剖面BSR识别分析及数值模拟可得知水合物稳定带范围。研究区内气体生成—运移过程、形成过程可概括为:深部热成因气和浅部生物成因气,经输导通道运移至水合物稳定带中,在合适的储层条件下形成水合物,其水合物系统成藏事件如图6

所示。

4 天然气水合物系统对我国水合物勘查的启示

(1)通过与含油气系统的对比分析,总结提出了天然气水合物系统,其内涵包括水合物气源、储层以及水合物稳定带3个基本要素,以及气体生成—运移过程和水合物形成过程2个基本作用。

(2)运用天然气水合物系统理论,对全球多个研究区进行了分析,从水合物气体来源、气体运移以及储层等方面进行了分析总结,认为冻土带内气体来源以热解气为主,也有生物成因气、混合成因气的存

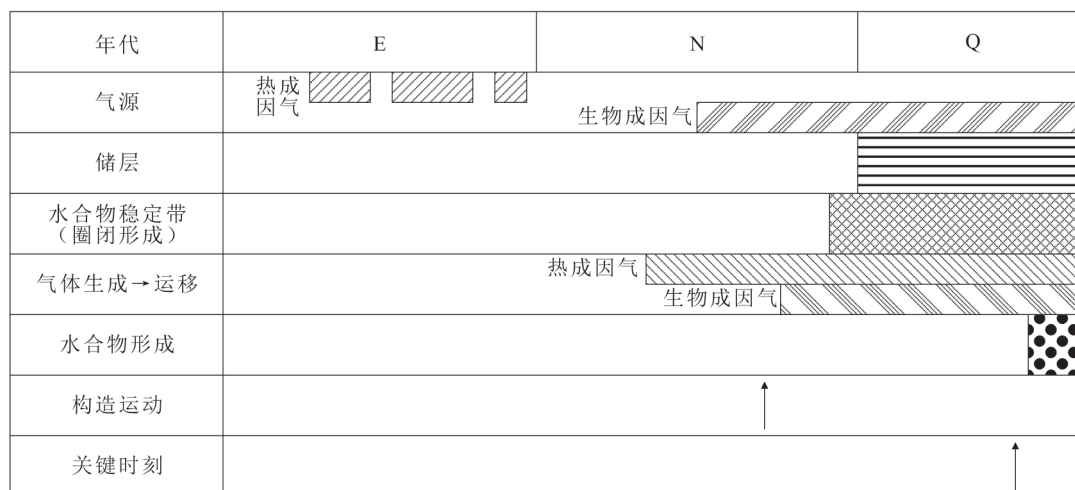


图6 天然气水合物系统成藏事件(箭头指代事件发生的时间)

Fig. 6 Accumulation events of gas hydrate system

在海洋环境中以生物成因气和混合成因气为主;水合物流体运移通道包含底辟、气烟囱、大尺度断层、裂缝、滑塌构造及高渗透性地层等;水合物储层岩性在冻土带以砂岩为主,海域则以黏土质粉沙及粉沙质黏土等细粒沉积物为主。在前人研究基础上,结合全球主要研究区水合物特征,提出了9种天然气水合物系统类型,并阐明了天然气水合物系统各地质要素在时空上的耦合关系。

(3)我国南海神狐海域天然气水合物自2017年试采成功以来,受到了各界的广泛关注。神狐海域天然气水合物系统类型主要包括热解气—底辟—海域黏土系统、生物气—扩散作用—海域黏土系统及生物气—气烟囱—海域黏土系统。基于天然气水合物系统理论,总结编绘的神狐海域天然气水合物系统成藏事件反映,虽然现阶段勘探实践表明水合物气体来源多为生物成因,但也绝不能忽视深部热解气的作用。同时,神狐海域已发现储层多为粉沙质黏土等细粒沉积物,与南海海槽等沙质沉积物有所不同,因此,在未来水合物勘查过程中,宜以落实和评价细粒储层为主,从基本要素和作用过程出发,重点关注热解气—底辟—海域黏土系统的气体生成—运移过程。

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 Jr E D, Koh C. Clathrate hydrates of natural gases[M]. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [3] Beaudoin Y C, Waite W, Boswell R, et al. Frozen heat: A UNEP global outlook on methane gas hydrates[J]. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, 2014, 29: 1-76.
- [4] Xu W, Germanovich L N. Excess pore pressure resulting from methane hydrate dissociation in marine sediments: A theoretical

approach[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2006, 111(B1): 1-2.

- [5] 吴能友, 梁金强, 王宏斌, 等. 海洋天然气水合物成藏系统研究进展[J]. 现代地质, 2008, 22(3): 356-362.
- [6] Dickens G R, O'Neil J R, Rea D K, et al. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene[J]. Paleoclimatology, 1995, 10(6): 965-971.
- [7] Farrimond P. Massive dissociation of gas hydrate during a Jurassic oceanic anoxic event[J]. Nature, 2000, 406: 392-395.
- [8] Maslin M, Owen M, Day S, et al. Linking continental-slope failures and climate change: Testing the clathrate gun hypothesis[J]. Geology, 2004, 32(1): 53-56.
- [9] Magoon L B, Dow W G. The petroleum system Chapter 1: Part I. Introduction[J]. AAPG Bulletin, 1994, 77: 3-24.
- [10] Milkov A V, Claypool G E, 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]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2005, 69(4): 1007-1026.
- [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] Collett T S, Johnson A H, Knapp C C, et al. Natural gas hydrates: A review[J]. Browse Collections, 2009, 89: 146-219.
- [13] 卜庆涛, 胡高伟, 业渝光, 等. 天然气水合物成藏体系研究进展[J]. 新能源进展, 2015, 3(6): 435-443.
- [14] 赵文智, 何登发. 含油气系统理论在油气勘探中的应用[J]. 中国石油勘探, 1996, 2: 12-19.
- [15] 陈骥, 刘晖, 姜在兴, 等. 天然气水合物含油气系统的形成条件、研究方法及其实例分析[J]. 地质科技情报, 2014, 33(6): 143-148.
- [16] 祝有海. 气体水合物的晶体结构和成因动力学[J]. 矿床地质, 1998, 17(增刊3): 499-502.
- [17] 龚建明, 张敏, 陈建文, 等. 天然气水合物发现区和潜在区气源成因[J]. 现代地质, 2008, 22(3): 415-419.
- [18] Kvenvolden K A. A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate[J]. Organic Geochemistry, 1995, 23(11/12): 997-1008.

- [19] 付少英. 烃类成因对天然气水合物成藏的控制[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 263-267.
- [20] Boswell R, Collett T. The gas hydrates resource pyramid[J]. Natural Gas & Oil, 2006, 304: 285-4541.
- [21] 乔少华, 苏明, 杨睿, 等. 海域天然气水合物钻探研究进展及启示: 储集层特征[J]. 新能源进展, 2015, 3(5): 357-366.
- [22] Noguchi S, Shimoda N, Takano O, et al. 3-D internal architecture of methane hydrate-bearing turbidite channels in the eastern Nankai Trough, Japan[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(10): 1817-1828.
- [23] Sassen R, Joye S, Sweet S T, et al. Thermogenic gas hydrates and hydrocarbon gases in complex chemosynthetic communities, Gulf of Mexico continental slope[J]. Organic Geochemistry, 1999, 30(7): 485-497.
- [24] Kvenvolden K A. Methane hydrate: A major reservoir of carbon in the shallow geosphere? [J]. Chemical Geology, 1988, 71(1): 41-51.
- [25] 何家雄, 陈胜红, 刘海龄, 等. 珠江口盆地白云凹陷北坡一番禹低隆起天然气成因类型及其烃源探讨[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 16-21.
- [26] Collett T S. Gas hydrate petroleum systems in marine and arctic permafrost environments[C]// Unconventional Energy Resources: Marking the unconventional conventional; 29th Annual GCSSEPM Proceedings. Houston, Texas; Gulf Coast Section of the Society of Economic Paleontologies and Mineralogists Foundation, 2009: 6-30.
- [27] Huang B J, Xiao X M, Dong W L. Multiphase natural gas migration and accumulation and its relationship to diapir structures in the DF1-1 gas field, South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19(7): 861-872.
- [28] 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.
- [29] 吴时国, 龚跃华, 米立军, 等. 南海北部深水盆地油气渗漏系统及天然气水合物成藏机制研究[J]. 现代地质, 2010, 24(3): 433-440.
- [30] 张伟. 南海北部主要盆地泥底辟/泥火山发育演化与油气及天然气水合物成矿成藏[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2016.
- [31] Kvenvolden K A. Gas hydrates as a potential energy resource—A review of their methane content, the future of energy gases [J]. Usgs Prof. Paper, 1993, 1570: 555-561.
- [32] 王力峰, 付少英, 梁金强, 等. 全球主要国家水合物探采计划与研究进展[J]. 中国地质, 2017, 44(3): 439-448.
- [33] 杨胜雄, 梁金强, 陆敬安, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征及主控因素新认识[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 1-14.
- [34] 何家雄, 祝有海, 陈胜红, 等. 天然气水合物成因类型及成矿特征与南海北部资源前景[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(2): 66-70.
- [35] 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.
- [36] 张伟, 梁金强, 陆敬安, 等. 中国南海北部神狐海域高饱和度天然气水合物成藏特征及机制[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(5).
- [37] 龚跃华, 杨胜雄, 王宏斌, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征[J]. 现代地质, 2009, 23(2): 210-216.
- [38] Yu X, Wang J, Liang J, et al. Depositional characteristics and accumulation model of gas hydrates in northern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 56(3): 74-86.
- [39] 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.
- [40] 何家雄, 颜文, 祝有海, 等. 南海北部边缘盆地生物气/亚生物气资源与天然气水合物成矿成藏[J]. 天然气工业, 2013, 33(6): 121-134.
- [41] 文怀军, 卢振权, 李永红, 等. 青海木里三露天井田天然气水合物调查研究新进展[J]. 现代地质, 2015, 29(5): 983-994.
- [42] 庞守吉, 祁连山木里天然气水合物钻孔沉积构造特征及与水合物分布关系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [43] 王伟超, 卢振权, 李永红, 等. 青海木里三露天天然气水合物分布与储层特征[J]. 现代地质, 2015, 29(5): 1035-1046.
- [44] 李永红, 王伟超, 卢振权, 等. 青海木里三露天地区天然气水合物资源量初步评价[J]. 现代地质, 2015, 29(5): 1251-1258.
- [45] Collett T S. Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River area, North Slope, Alaska [J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(5): 793-812.
- [46] Inks T L, Lee M W, Agena W F, et al. Seismic prospecting for gas hydrate and associated free-gas prospects in the Milne Point area of northern Alaska [C] // Collett T, Johnson A, Knapp C, et al. Natural gas hydrates: Energy resource potential and associated geologic hazards. AAPG Memoir 89, 2009: 555-583.
- [47] 陈多福, 王茂春, 徐文新, 等. 墨西哥湾西北陆坡天然气水合物资源评价[J]. 海洋地质前沿, 2003, 19(12): 14-17.
- [48] Ginsburg G D, Soloviev V A. Methane migration within the submarine gas-hydrate stability zone under deep-water conditions[J]. Marine Geology, 1997, 137(1): 49-57.
- [49] Brooks J M, Anderson A L, Sassen R, et al. Hydrate occurrences in shallow subsurface cores from continental slope sediments[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 1994, 715(1): 381-391.
- [50] Milkov A V, Sassen R. Estimate of gas hydrate resource, northwestern Gulf of Mexico continental slope[J]. Marine Geology, 2001, 179(1): 71-83.
- [51] Hutchinson D R, Hart P E, Ruppel C D, et al. Seismic and thermal characterization of a bottom simulating reflection in the Northern Gulf of Mexico [C] // Collett T, Johnson A, Knapp C, et al. Natural gas hydrates: Energy resource potential and associated geologic hazards. AAPG Memoir 89, 2009: 266-286.
- [52] Cook A E, Goldberg D, Kleinberg R L. Fracture-controlled gas hydrate systems in the northern Gulf of Mexico[J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25(9): 932-941.
- [53] Boswell R, Frye M, Shelander D, et al. Architecture of gas-hydrate-bearing sands from Walker Ridge 313, Green Canyon 955, and Alaminos Canyon 21: Northern deepwater Gulf of Mexico[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 34(1): 134-149.
- [54] Heeschen K U, Collier R W, Angelis M A D, et al. Methane sources, distributions, and fluxes from cold vent sites at Hydrate Ridge, Cascadia Margin[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(2): 1-19.
- [55] Tréhu A M, Flemings P B, Bangs N L, et al. Feeding methane vents and gas hydrate deposits at south Hydrate Ridge[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(23): 345-357.
- [56] Heeschen K U, Tréhu A M, Collier R W, et al. Distribution and height of methane bubble plumes on the Cascadia Margin characterized by acoustic imaging[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(12): 1643.

- [57] Liu X, Flemings P B. Passing gas through the hydrate stability zone at southern Hydrate Ridge, offshore Oregon[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2006, 241(1/2): 211-226.
- [58] 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.
- [59] Tsunogai U, Yoshida N, Gamo T. Carbon isotopic evidence of methane oxidation through sulfate reduction in sediment beneath cold seep vents on the seafloor at Nankai Trough[J]. Marine Geology, 2002, 187(1/2): 145-160.
- [60] Colwell F, Matsumoto R, Reed D. A review of the gas hydrates, geology, and biology of the Nankai Trough[J]. Chemical Geology, 2004, 205(3/4): 391-404.
- [61] Tsuji T, Ashi J, Ikeda Y. Strike-slip motion of a mega-splay fault system in the Nankai oblique subduction zone[J]. Earth Planets & Space, 2014, 66(1): 1-14.
- [62] Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates[J]. Marine Geology, 2000, 167(1): 29-42.
- [63] Hamamoto H, Yamano M, Goto S, et al. Heat flow distribution and thermal structure of the Nankai subduction zone off the Kii Peninsula[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2013, 12(10): 1-22.
- [64] Jia J, Tsuji T, Matsuoka T. Gas hydrate saturation and distribution in the Kumano Forearc Basin of the Nankai Trough[J]. Exploration Geophysics, 2016, 48(2): 137-150.
- [65] Fujii T, Saeki T, Kobayashi T, et al. Resource assessment of methane hydrate in the Eastern Nankai Trough, Japan[C]// Proceedings of 2008 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA: [s. n.], 2008: 1-15.
- [66] Dallimore S R, Collett T S. Scientific results from the Mallik 2002 gas hydrate production research well program, Mackenzie Delta, northwest territories, Canada[J]. Bulletin of the Geological Survey of Canada, 2005, 585: 1-16.
- [67] Majorowicz J, Osadetz K, Safanda J. Gas hydrate formation and dissipation histories in the northern margin of Canada: Beaufort-Mackenzie and the Sverdrup Basins[J]. Journal of Geological Research, 2012: 1176-1182.
- [68] Majorowicz J A, Hannigan P K. Stability zone of natural gas hydrates in a permafrost-bearing region of the Beaufort-Mackenzie Basin: Study of a feasible energy source I (Geological Survey of Canada Contribution No. 1999275)[J]. Natural Resources Research, 2000, 9(1): 3-26.
- [69] Lane L S, Dietrich J R. Tertiary structural evolution of the Beaufort Sea-Mackenzie Delta region, Arctic Canada[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1995, 43(3): 293-314.
- [70] 刘杰, 孙美静, 杨睿, 等. 马更些三角洲冻土区天然气水合物成藏的地质控制因素[J]. 新能源进展, 2018, 6(1): 47-54.
- [71] Ryu B J, Riedel M, Kim J H, et al. Gas hydrates in the western deep-water Ulleung Basin, East Sea of Korea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(8): 1483-1498.
- [72] Dong G Y, Kang N K, Yi B Y, et al. Occurrence and seismic characteristics of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 47(11): 236-247.
- [73] 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(11): 182-194.
- [74] Holland M, Schultheiss P, Roberts J, et al. Observed gas hydrate morphologies in marine sediments[C]// Anon. 6th International Conference on Gas Hydrates. Chevron. Vancouver, BC, Canada: [s. n.], 2008: 6-10.
- [75] Bahk J J, Kim D H, Chun J H, et al. Gas hydrate occurrences and their relation to host sediment properties: Results from Second Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition, East Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 47(11): 21-29.
- [76] Kumar P, Collett T S, Boswell R, et al. Geologic implications of gas hydrates in the offshore of India: Krishna-Godavari Basin, Mahanadi Basin, Andaman Sea, Kerala-Konkan Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 58(A): 29-98.
- [77] Lorenson T D, Collett T S. National Gas Hydrate Program Expedition 01 offshore India: Gas hydrate systems as revealed by hydrocarbon gas geochemistry[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 92: 477-492.
- [78] Ramana M V, Ramprasad T, Paropkari A L, et al. Multidisciplinary investigations exploring indicators of gas hydrate occurrence in the Krishna-Godavari Basin offshore, east coast of India[J]. Geo-Marine Letters, 2009, 29(1): 25-38.
- [79] 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(7): 1476-1493.
- [80] 张卫东, 王瑞和, 任韶然, 等. 由麦索雅哈水合物气田的开发谈水合物的开采[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(4): 94-96.
- [81] Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas-hydrates: A potential energy source for the 21st Century[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2007, 56(1): 14-31.
- [82] 吴传芝, 赵克斌, 孙长青, 等. 天然气水合物开采研究现状[J]. 地质科技情报, 2008, 27(1): 47-52.
- [83] 付少英, 陆敬安. 神狐海域天然气水合物的特征及其气源[J]. 海洋地质前沿, 2010, 26(9): 6-10.
- [84] Naehr T H, Rodriguez N M, Bohrmann G, et al. Methane-derived authigenic carbonates associated with gas hydrate decomposition and fluid venting above the Blake Ridge Diapir[J]. Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results, 2000, 164: 285-300.
- [85] Lanoil B D, Sassen R, Duc M T L, et al. Bacteria and Archaea physically associated with Gulf of Mexico gas hydrates[J]. Applied & Environmental Microbiology, 2001, 67(11): 5143-5153.
- [86] Choi J, 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.
- [87] Majorowicz J A, Hannigan P K. Natural gas hydrates in the offshore Beaufort-Mackenzie Basin—Study of a feasible energy source II[J]. Natural Resources Research, 2000, 9(3): 201-214.