

天然气水合物藏的界定及思考

张金华¹, 魏伟¹, 陈龙桥², 林斌斌², 彭涌¹, 肖红平¹

1. 中国石油勘探开发研究院新能源研究所, 廊坊 065007

2. 中国石油集团海洋工程有限公司钻井事业部, 天津 300280

摘要 在回顾致密气、页岩气、煤层气等非常规天然气藏定义的基础上, 基于天然气水合物藏的特征, 认为天然气水合物藏是指具有一定的甲烷等气体运移到温度-压力适宜的地层, 并以固态形式赋存于地层/松散沉积物中的天然气水合物资源及其与之有直接关联的天然气聚集。因此, 在开展天然气水合物资源勘查与评价时, 应当查明天然气水合物层下部游离气状况, 存在游离气层的“固-气两层楼式”天然气水合物藏是当前有利的天然气水合物开发靶体。分析认为神狐海域天然气水合物属于“固-气两层楼式”天然气水合物藏, 在进行资源评价和试采时, 应该对天然气水合物层和游离气层进行统一考虑, 从而有望进一步提高单井日产量和经济效益, 促进天然气水合物的勘探与开发。

关键词 天然气水合物藏; 神狐海域; 勘查与评价; 游离气; 固-气两层楼式

天然气水合物是由烃类气体(主要是甲烷)和水在一定温度和压力条件下形成的笼型固态似冰状物质^[1], 广泛分布于全球大陆边缘和永久冻土区。21世纪以来, 国内外对天然气水合物进行了多次试采研究(表1), 其中, 极地冻土区天然气水合物试采平均单井日产量

量高值为2008年加拿大麦肯齐三角洲天然气水合物降压试采, 平均日产量约2000 m³; 海域天然气水合物试采平均单井日产量高值为2013年日本南海海槽天然气水合物降压试采, 平均日产量约20000 m³。2017年中国南海神狐海域降压试采平均日产量约5150 m³。

表1 天然气水合物试采情况统计
Table 1 Pilot production statistics on natural gas hydrate

地带	地区	年份	开采方法	开采周期	累计产气量/m ³
极地冻土带	加拿大麦肯齐三角洲	2002	加热法	5天	470 ^[2]
	加拿大麦肯齐三角洲	2008	降压法	6天	13000 ^[2]
	美国阿拉斯加北坡	2012	CO ₂ 置换	30天	28300 ^[3]
海域	日本南海海槽	2013	降压法	6天	120000 ^[4]
	日本南海海槽	2017	降压法	12天	35000 ^[5]
	日本南海海槽	2017	降压法	24天	200000 ^[5]
	中国南海荔湾海域	2017	固态流化法	5天	81 ^[6]
	中国南海神狐海域	2017	降压法	60天	309000 ^[5]

收稿日期: 2017-11-14; 修回日期: 2017-12-06

基金项目: 中国石油油气勘探科技项目(2016B-4901); 中国石油-中国科学院科技合作项目(2015A-4813)

作者简介: 张金华, 工程师, 研究方向为天然气水合物等非常规能源, 电子信箱: zhangjh69@petrochina.com.cn

引用格式: 张金华, 魏伟, 陈龙桥, 等. 天然气水合物藏的界定及思考[J]. 科技导报, 2018, 36(9): 84-90; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.09.011

整体而言,当前天然气水合物试采还存在着单井日产量低、递减速度快等问题,其影响因素除了勘查与“甜点区”识别、防砂与储层改造、开采工艺等技术问题外,天然气水合物藏的界定及认识也在一定程度上制约了天然气水合物的高产和商业化进程。

1 天然气水合物藏的界定

非常规天然气主要包括致密气、煤层气、页岩气和天然气水合物等,目前国内致密气、煤层气和页岩气已经实现了规模工业化开发,致密气处于规模勘探开发早期,煤层气处于提高单井产量阶段,页岩气处于示范区突破和建产阶段^[7]。针对致密气藏、页岩气藏和煤层气藏的定义较为一致,致密气藏是指储集于低渗透-特低渗透致密砂岩储层中的天然气资源,需通过大规模压裂或特殊采气工艺技术才能实现经济开发^[8-9]。煤层气藏是指含有一定量的甲烷气体、具有相对独立流体系统的、以含煤地层为主体的地质体^[10]。页岩气藏是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中,以吸附或游离状态为主要存在方式的天然气聚集。在页岩气藏中,天然气也存在于夹层状的粉砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩甚至砂岩地层中^[11]。

上述针对致密气藏、煤层气藏和页岩气藏的界定,考虑因素包括储层类型和物性、工程技术、气体运移、气体聚集的地质体等方面。对于天然气水合物藏的界定,基于常规油气勘探理念,提出了涵盖天然气水合物温度-压力条件、气源、气体运移和天然气水合物生长适宜储层等要素的天然气水合物油气系统^[12];根据地质、储层特征及其开发策略,国外学者将天然气水合物藏分为4种聚集类型^[13-16]:1) Class 1天然气水合物藏,其特征是天然气水合物层上覆在含有游离气和自由水的地层之上,天然气水合物层底部通常与天然气水合物稳定带底部一致,被认为是最具开采潜力的天然气水合物藏;2) Class 2天然气水合物藏,其特征是天然气水合物层上覆在含有自由水的地层之上;3) Class 3天然气水合物藏,其特征是仅赋存天然气水合物层,其底层和盖层均为非渗透层;4) Class 4天然气水合物藏,其特征是天然气水合物为弥散状态、且饱和度低,无盖层和底层。Class 1、Class 2和Class 3天然气水合物藏在海洋和冻土系统中均存在,而Class 4天然气水合物藏仅存在海洋系统中。海洋和冻土系统中的天然气水合物藏在盐度、初始温度和压力、饱和度等方面存在差

异^[15]。国内学者认为天然气水合物藏具有以下几方面显著特征^[17]:天然气水合物位于天然气水合物稳定带内,受控于温度和压力;天然气水合物在地层中以固态形态存在;天然气水合物可保存在未固结沉积物中,也可保存在固结地层中。在国内对致密气藏、煤层气藏和页岩气藏的界定以及国内外对天然气水合物藏的认识的基础上,从勘探开发角度,笔者对天然气水合物藏界定为:天然气水合物藏是指具有一定量的甲烷等气体运移到温度-压力适宜的地层,并以固态形式赋存于地层/松散沉积物中的天然气水合物资源及其与之有直接关联的天然气聚集。与油气藏的生、储、盖、圈、运、保六要素类似,天然气水合物藏至少涵盖生、储、圈(温度-压力圈闭)、运、保等5要素。从资源角度看,天然气水合物藏可以包涵两个储层中的天然气资源(图1):1) 上覆的固态天然气水合物资源(I),其以弥散型、结节型、脉状型或块状型分布于沉积物中;2) 与赋存固态天然气水合物的沉积层相邻的、具有连通流体系统的下伏游离气资源(II),固态天然气水合物沉积层同时起着封盖层的作用,笔者将此类天然气水合物藏称之为“固-气两层楼式”天然气水合物藏,并认为该类天然气水合物藏是当前较为有利的勘探开发目标。

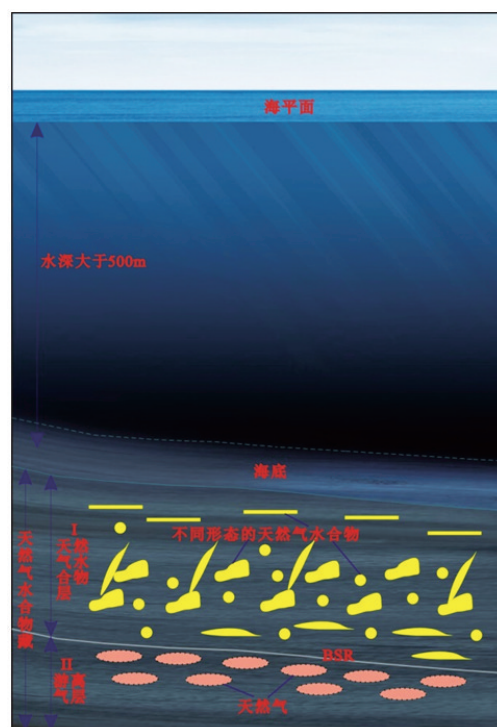


图1 “固-气两层楼式”天然气水合物藏示意

Fig. 1 Sketch map of “solid-gas two-story-architecture style” natural gas hydrates reservoir

2 勘探开发理念的转变

中国非常规复杂油气藏资源丰富,但勘探开发工作面临诸多挑战,勘探开发理念也正发生转变^[18-19]。针对低品位资源的高效益开发,提出地质工程一体化是有效开发的必由之路^[19]。针对海上油气田开发,认为不能照搬陆上油田“滚动”开发经验,提出了海上油气田勘探开发一体化理念^[20]。地质的认识对于勘探开发具有重要的指导意义。基于“源控论”得出了勘探找油的“定凹选带”认识,而富油气凹陷“满凹含油”论使油气勘探跳出二级构造带范围,实现满凹勘探^[21],大油气区地质勘探理论的提出指导了一大批重大发现^[22]。天然气水合物藏的界定和认识对于天然气水合物的勘探开发也将产生积极的影响。基于海洋天然气水合物占全球天然气水合物资源量的90%以上^[23],且海洋砂质沉积物中的天然气水合物又是最具开采潜力的目标之一^[24],为此,本文重点从天然气水合物藏的界定和认识对海洋天然气水合物勘探开发影响的角度展开讨论。

2.1 勘查识别

国内外海洋天然气水合物的勘查和识别主要包括地球物理勘探、地球化学和地质(包括冷泉大生物)等3大类方法^[25]。存在天然气水合物的地区,底层海水、海底沉积物及孔隙水中的甲烷等烃类气体和 H_2S 、 CO_2 等非烃类气体的含量,以及地表形态和生物群落等通常会出现异常^[25-26],基于这些异常特征,形成了相应的天然气水合物地球化学和地质勘查识别方法。对于“固-气两层楼式”天然气水合物藏,这些地球化学和地质勘查识别方法同样适用。

地震等地球物理勘探方法仍是目前应用最广泛而有效的方法。在天然气水合物勘探中,主要通过在地震剖面上寻找海洋沉积物中存在天然气水合物的最直观证据——似海底反射(bottom simulating reflection, BSR),同时结合天然气水合物层的高纵波速度、高纵波阻抗、高横波阻抗、高弹性阻抗等弹性特征^[27-28]。这些勘探识别方法主要是针对天然气水合物层,在新的认识下,除了要对上覆天然气水合物层进行勘查识别外,还应对下伏的游离气层进行勘查,开展游离气沉积物的弹性特征和游离气饱和度地震反演分析,并确定游离气的分布。在天然气水合物勘查试采选区方面,也应重点关注上覆天然气水合物层、下伏游离气层的“固-气两层楼式”天然气水合物藏。下伏游离气的存在,一方面显示出区域内具备天然气水合物形成的气

源条件,另一方面也进而表明区域具有丰富的气源,有利于形成较高饱和度的天然气水合物,形成资源“甜点区”。

2.2 资源量评价

当前天然气水合物资源量的评价主要以体积法为主,关键参数主要包括天然气水合物分布区面积、天然气水合物成矿带厚度、天然气水合物沉积层孔隙度、天然气水合物饱和度、天然气水合物容积倍率和聚集率^[29]。学者在对中国天然气水合物资源进行评价时,也主要是针对天然气水合物稳定带内的天然气水合物层,即上覆的天然气水合物层中的天然气资源进行评价,而没有对下伏游离气层中的天然气资源开展评价^[30-33]。国外在对天然气水合物资源评价时,大多也只针对天然气稳定带中的天然气水合物资源进行评价^[34-35],仅有一部分同时对天然气水合物稳定带底部的游离气共同进行评价^[36-38]。开展天然气资源评价时,需要明确天然气的成因类型,在此基础上,根据勘探程度,可以采用盆地模拟方法、蒙特卡洛法、类比法等多种方法进行资源评价^[39-40]。

针对“固-气两层楼式”天然气水合物藏的新认识,笔者提出天然气水合物资源评价应该包括以下方面:基于BSR、压力-温度、气体等建立天然气水合物稳定带范围;在天然气水合物稳定带内,开展天然气水合物赋存范围、沉积物孔隙度、天然气水合物饱和度等研究,评价天然气水合物稳定带内的天然气水合物资源量;在天然气水合物稳定带下部,开展与上覆天然气水合物有直接关联天然气层的资源量评价;上述2种资源量总和为天然气水合物藏的整体资源量。

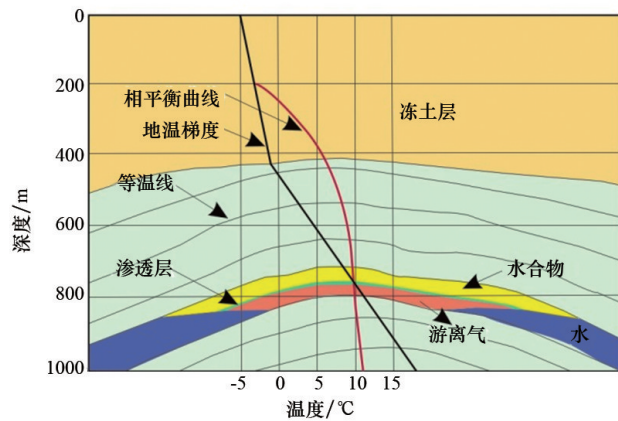
2.3 开发方式

目前主要有降压法、热激发法、抑制剂3种途径开采天然气水合物中的天然气^[41],这些方法基本是针对天然气水合物储层采取相应措施,主要途径是通过降压使系统压力低于天然气水合物的相平衡压力,通过加热使系统温度高于天然气水合物的相平衡温度,或者通过加入化学抑制剂改变天然气水合物的相平衡。

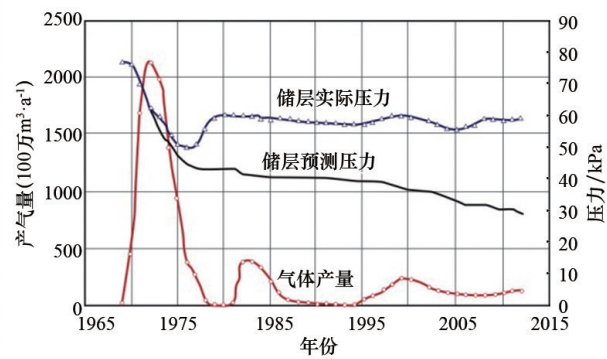
针对“固-气两层楼式”天然气水合物藏的开采,不应当只着手上覆天然气水合物的开采,而应结合下伏游离气综合考虑。在实际开采过程中,可以考虑优先针对天然气储层进行开发,或者将开采层位设计在天然气水合物层和天然气层的交界面,伴随天然气的开发,“固-气两层楼式”天然气水合物藏整体压力将下

降,从而诱发上覆天然气水合物的分解,最终实现整个天然气水合物藏的有效开发。例如,作为世界上唯一进行商业开采的天然气水合物藏-麦索亚哈气田属于典型的“固-气两层楼式”天然气水合物藏,下部为游离态的天然气,上部覆盖着固态的天然气水合物(图2

(a)),天然气水合物和天然气之间没有沉积不渗透边界^[42]。该气田从1969年开始试验开采,半连续生产到2011年(图2(b)),累计天然气产量为129亿 m^3 ,其中54亿 m^3 的天然气是通过降压后上覆天然气水合物分解获得的^[43]。



(a) 天然气水合物构造



(b) 产气曲线

图2 麦索亚哈天然气水合物构造与产气曲线

Fig. 2 Structure and production diagram of Messoyakha gas hydrate

3 神狐海域天然气水合物藏

神狐海域主体位于珠江口盆地白云凹陷内,地理位置上处于神狐暗沙东南海域附近,西沙海槽与东沙群岛之间,是中国天然气水合物勘探的一个重点区域,勘探程度相对较高,2007—2016年先后实施了3次天然气水合物钻探,2017年在该海域成功实施了天然气水合物试采^[15,44-46]。

勘探研究显示,神狐海域共发育厚层状、分散状、斑块状、断层附近和薄层状5种赋存状态的天然气水合物,杨胜雄等^[47]对神狐海域天然气水合物成藏序列进行了研究(图3),认为区域内水深一般为900~1500 m,BSR一般分布在海底下150~300 m的范围内,厚层状和分散状天然气水合物是区域内的主力天然气水合物层,天然气水合物层的下部常见游离气层的发育。由此可见,神狐海域天然气水合物也具备“固-气两层楼式”天然气水合物藏的特征。为此,下步开展神狐海域天然气水合物勘查时,建议除了应针对上覆天然气水合物层开展勘查识别和资源量评价外,还应针对下伏游离气层开展勘查识别与资源量评价,从而进一步落实资源和天然气水合物“甜点区”,为天然气水合物开发提供优质靶区。

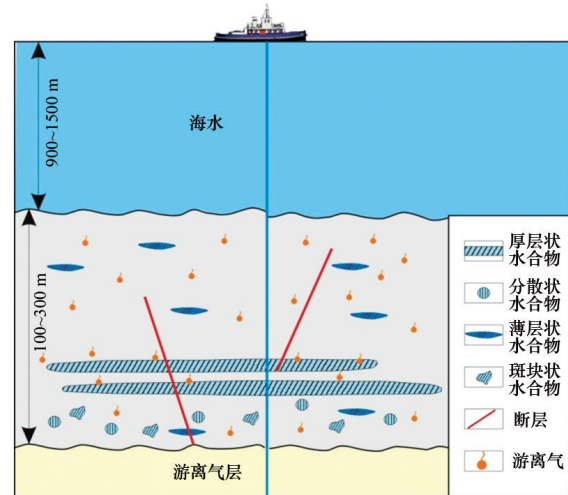


图3 神狐海域天然气水合物成藏序列(修改自文献[47])

Fig. 3 Accumulation sequence of gas hydrate in Shenhu area, South China Sea

2017年5—7月,中国在神狐海域成功进行了天然气水合物试采,采用的开采方法是“地层流体抽取”降压法,并对天然气水合物储层进行了改造。连续试采60天,累计产气量超30万 m^3 ,日均产气5000 m^3 以上,初期最高日产量达3.5万 m^3 ^[48]。数据显示试采井平均日产量低且递减速度快,初步认为下伏游离气层对本次

天然气水合物试采具有一定贡献,且在试采初期游离气占较大的比例。笔者认为,作为“固-气两层楼式”天然气水合物藏的神狐海域天然气水合物,在对其进行试采/开采方案编制时,应该通盘考虑上覆天然气水合物层和下伏游离气层的资源规模和特征,从单井日产量、经济性和可持续性角度,以设计更为合理的方案,从而能更快推动天然气水合物商业化开发进程。

4 结论

1) 基于致密气、页岩气、煤层气等非常规天然气藏和天然气水合物藏的特征,对天然气水合物藏进行了界定,天然气水合物藏是指具有一定量的甲烷等气体以固态形式赋存于地层/松散沉积物中的天然气水合物资源及其与之有直接关联的天然气聚集。

2) 在开展天然气水合物资源勘查和评价时,应当查明天然气水合物层下部是否含有游离气层。存在游离气层的“固-气两层楼式”天然气水合物藏是当前有利的天然气水合物开发靶体。“固-气两层楼式”天然气水合物藏的勘探、资源量评价及其开发应该涵盖上覆天然气水合物层和下伏游离气层两个部分。

3) 神狐海域天然气水合物属于“固-气两层楼式”天然气水合物藏,在进行资源勘查和试采时,应该对天然气水合物层和游离气层进行统一考虑,从而有望进一步提高单井日产量和经济效益,促进天然气水合物的勘探与开发。

参考文献(References)

- [1] Kvenvolden K A. Gas Hydrates-Geological perspective and global change[J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(2): 173-187.
- [2] Yamamoto K, Dallimore S. Aurora-JOGMEC-NRCan Mallik 2006-2008 gas hydrate research project progress[J]. *Fire in the Ice*, 2008, 8(3): 1-5.
- [3] The Ignik Sikumi Gas Hydrate Exchange Trial Project Team. Ignik sikumi gas hydrate field trial completed[J]. *Fire in the Ice*, 2012, 12(1): 1-2.
- [4] Yamamoto K. Japan completes first offshore methane hydrate production test-methane successfully produced from deep water hydrate layers[J]. *Fire in the Ice*, 2013, 13(2): 1-2.
- [5] 吴西顺, 黄文斌, 刘文超, 等. 全球天然气水合物资源潜力评价及勘查试采进展[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(7): 63-78.
Wu Xishun, Huang Wenbin, Liu Wenchao, et al. World-wide progress of resource potential assessment, exploration and production test of natural gas hydrate[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, 33(7): 63-78.
- [6] 周守为, 陈伟, 李清平. 深水浅层非成岩天然气水合物固态流化试采技术研究及进[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(4): 1-8.
Zhou Shouwei, Li Wei, Li Qingping, et al. Research on the solid fluidization well testing and production for shallow non-diagenetic natural gas hydrate in deep water area[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(4): 1-8.
- [7] 姜鑫民, 田磊, 刘琪, 等. 我国非常规天然气发展战略研究[J]. *中国能源*, 2017, 39(6): 8-11.
Jiang Xinmin, Tian Lei, Liu Qi, et al. Strategic research of unconventional natural gas development in China[J]. *Energy of China*, 2017, 39(6): 8-11.
- [8] 李建忠, 郭彬程, 郑民, 等. 中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(4): 607-615.
Li Jianzhong, Guo Bincheng, Zheng Min, et al. Main types, geological features and resource potential of tight sandstone gas in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(4): 607-615.
- [9] 魏国齐, 张福东, 李君, 等. 中国致密砂岩气成藏理论进展[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(2): 199-210.
Wei Guoqi, Zhang Fudong, Li Jun, et al. New progress of tight sand gas accumulation theory and favorable exploration zones in China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(2): 199-210.
- [10] 陈振宏. 高、低煤阶煤层气藏主控因素差异性对比研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2007.
Chen Zhenhong. Key controlling factors comparison between high and low rank CBM reservoir formation [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [11] 聂海宽, 张金川. 页岩气藏分布地质规律与特征[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2010, 41(2): 700-708.
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan. Shale gas reservoir distribution geological law, characteristics and suggestions [J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2010, 41(2): 700-708.
- [12] Collett T S. Gas hydrate petroleum systems in marine and arctic permafrost environments[C]//Unconventional Energy Resources: Making the Unconventional Conventional, 29th Annual Research Conference. Houston: GCSSEPM, 2009: 6-30.
- [13] Reagan M T, Moridis G J, Zhang Keni. Sensitivity analysis of gas production from Class 2 and Class 3 hydrate deposits [R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009.
- [14] Moridis G J, Collett T S. Strategies for gas production from hydrate accumulations under various geologic conditions [R]. Report Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003.
- [15] Moridis G, Reagan M T. Estimating the upper limit of gas production from Class 2 hydrate accumulations in the permafrost: 1. Concepts, system description, and the production base case [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, 76(3-4): 194-204.
- [16] Moridis G J, Sloan E D. Gas production potential of disperse low-saturation hydrate accumulations in oceanic sediments[J].

- Energy Conversion and Management, 2007, 48(6): 1834–1849.
- [17] 董刚, 龚建明, 王家生. 从天然气水合物赋存状态和成藏类型探讨天然气水合物的开采方法[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(6): 59–64.
Dong Gang, Gong Jianming, Wang Jiasheng. Gas hydrate exploitation methods upon types and occurrence of gas hydrate accumulations[J]. Marine Geology Frontiers, 2011, 27(6): 59–64.
- [18] 吴奇, 梁兴, 鲜成钢, 等. 地质-工程一体化高效开发中国南方海相页岩气[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(4): 1–5.
Wu Qi, Liang Xing, Xian Chenggang, et al. Geoscience-to-production integration ensures effective and efficient South China marine shale gas development[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(4): 1–5.
- [19] 胡文瑞. 地质工程一体化是实现复杂油气藏效益勘探开发的必由之路[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 1–5.
Hu Wenrui. Geology-engineering integration: A necessary way to realize profitable exploration and development of complex reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 1–5.
- [20] 胡光义, 孙福街, 范廷恩, 等. 海上油气田勘探开发一体化理念、基本思路 and 对策[J]. 中国海上油气, 2013, 25(6): 61–64.
Hu Guangyi, Sun Fujie, Fan Tingen, et al. A conception of exploration-development integration and the relative working principles and procedure in offshore oil and gas fields [J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(6): 61–64.
- [21] 赵文智, 邹才能, 汪泽成, 等. 富油气凹陷“满凹含油”论—内涵与意义[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 5–13.
Zhao Wenzhi, Zou Caineng, Wang Zecheng, et al. The intensification and signification of "sag-wide Oil-Bearing Theory" in the Hydrocarbon-rich Depression with terrestrial origin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2): 5–13.
- [22] 赵政璋, 杜金虎, 邹才能, 等. 大油气区地质勘探理论及意义[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(5): 513–522.
Zhao Zhengzhang, Du Jinhu, Zou Caineng, et al. Geological exploration theory for large oil and gas provinces and its significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 513–522.
- [23] Edwards R N. On the resource evaluation of marine gas hydrate deposits using sea-floor transient electric dipole-dipole methods [J]. Geophysics, 1997, 62(1): 63–74.
- [24] Boswell R, Collett T. The gas hydrates resource pyramid[J]. Fire in the Ice, 2006, 6(3): 5–7.
- [25] 苏新, 陈芳, 张勇, 等. 海洋天然气水合物勘查和识别新技术: 地质微生物技术[J]. 现代地质, 2010, 24(3): 409–423.
Su Xin, Chen Fang, Zhang Yong, et al. Geomicrobiology as a new tool for exploration of marine gas hydrates[J]. Geoscience, 2010, 24(3): 409–423.
- [26] 杨志斌, 孙忠军. 天然气水合物地球化学勘查方法[J]. 物探与化探, 2011, 35(3): 1–5.
Yang Zhibin, Sun Zhongjun. Geochemical exploration methods for natural gas hydrate[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2011, 35(3): 1–5.
- [27] 张明, 伍忠良. 天然气水合物 BSR 的识别与地震勘探频率[J]. 海洋学报, 2004, 26(4): 80–88.
Zhang Ming, Wu Zhongliang. The seismic frequency effect on recognition of the BSR of gas hydrate[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(4): 80–88.
- [28] 李传辉. 含水合物地层地震波衰减特性及衰减系数估计方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
Li Chuanhui. Seismic wave attenuation in hydrate-bearing sediments and the estimates of attenuation coefficient[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [29] 孙运宝, 赵铁虎, 蔡峰. 国外海域天然气水合物资源量评价方法对我国的启示[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(1): 27–35.
Sun Yunbao, Zhao Tiehu, Cai Feng. Gas hydrate resource assessment abroad and its implication[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(1): 27–35.
- [30] 张光学, 黄永祥, 祝有海, 等. 南海天然气水合物的成矿远景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(1): 75–81.
Zhang Guangxue, Huang Yongyang, Zhu Youhai, et al. Prospect of gas hydrate resources in the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(1): 75–81.
- [31] 陈多福, 李绪宣, 夏斌. 南海琼东南盆地天然气水合物稳定域分布特征及资源预测[J]. 地球物理学报, 2004, 47(3): 483–489.
Chen Duofu, Li Xuxuan, Xia Bin. Distribution of gas hydrate stable zones and resource prediction in the Qiongdongnan basin of the South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(3): 483–489.
- [32] 葛倩, 王家生, 向华, 等. 南海天然气水合物稳定带厚度及资源量估算[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2006, 31(2): 245–249.
Ge Qian, Wang Jiasheng, Xiang Hua, et al. Computation of thickness of gas hydrate stability zone and potential volume of gas hydrate in South China Sea[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(2): 245–249.
- [33] 王秀娟, 吴时国, 刘学伟, 等. 基于测井和地震资料的神狐海域天然气水合物资源量估算[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1288–1297.
Wang Xiujuan, Wu Shiguo, Liu Xuewei, et al. Estimation of gas hydrates resources based on well log data and seismic data in Shenhu area[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(4): 1288–1297.
- [34] Milkov A V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there[J]. Earth-Science Reviews, 2004, 66(3/4): 183–197.
- [35] Boswell R, Collett T S. Current perspectives on gas hydrate resources[J]. Energy & Environmental Science, 2011, 4(4): 1206–1215.
- [36] Collett T S. Gas hydrate resources of the United States[R/OL]. [2017-11-01]. https://www.boem.gov/uploadedfiles/boem/oil_and_gas_energy_program/resource_evaluation/gas_hydrates/hydrate.pdf.

- [37] Holbrook W S, Hoskins H, Wood W T, et al. Methane hydrate and free gas on the Blake Ridge from vertical seismic profiling [J]. *Science*, 1996, 273(5283): 1840-1843.
- [38] Sain K, Ojha M. Estimation of gas hydrates and free gas concentrations using seismic amplitudes across the bottom simulating reflector[J]. *Advances in Geosciences*, 2010, 18: 181-196.
- [39] 何兴华. 松南天然气勘探目标资源评价研究[J]. *天然气工业*, 2000, 20(增刊1): 10-18.
He Xinghua. Resource evaluation research on natural gas exploration targets in the south part of Songliao basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2000, 20(Suppl 1): 10-18.
- [40] 郝石生, 柳广弟, 黄志龙, 等. 天然气资源评价的运聚动平衡模型[J]. *石油勘探与开发*, 1993, 20(3): 16-21.
Hao Shishegn, Liu Guangdi, Huang Zhilong, et al. Dynamic equilibrium model of migration and accumulation for natural gas resource evaluation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1993, 20(3): 16-21.
- [41] 苏正, 吴能友, 张可霓. 南海北部陆坡神狐天然气水合物开发潜力[J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(6): 16-23.
Su Zheng, Wu Nengyou, Zhang Keni. Assessment of gas production potential of hydrate deposits at Shenhu area on northern continental slope of South China Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(6): 16-23.
- [42] 邵明娟, 张炜, 吴西顺, 等. 麦索亚哈气田天然气水合物的开发[J]. *国土资源情报*, 2016(12): 17-19, 31.
Shao Mingjuan, Zhang Wei, Wu Xishun, et al. Natural gas hydrate exploitation at Messoyakha gas field[J]. *Land and Resources Information*, 2016(12): 17-19, 31.
- [43] Makogon Y F, Omelchenko R Y. Commercial gas production from Messoyakha deposit in hydrate conditions[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2013, 11: 1-6.
- [44] Yang S X, Zhang M, Liang J Q, 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): 1-5.
- [45] 郭依群, 杨胜雄, 梁金强, 等. 南海北部神狐海域高饱和度天然气水合物分布特征[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 24-31.
Guo Yiqun, Yang Shengxiong, Liang Jinqiang, et al. Characteristics of high gas hydrate distribution in the Shenhu area on the northern slope of the South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 24-31.
- [46] 朱其, 吴其林, 吴迅达, 等. 神狐海域与西沙海槽天然气水合物成藏模式对比[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(7): 55-62.
Zhu Qi, Wu Qilin, Wu Xunda, et al. A comparative study on gas hydrate accumulations in Shenhu area and Xisha trough [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, 33(7): 55-62.
- [47] 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.
Yang Shengxiong, Liang Jinqiang, Lu Jingan, et al. New understanding on the characteristics and controlling factors of gas hydrate reservoirs in the Shenhu area on the northern slope of the South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 1-14.
- [48] 吴昊. 我国首次海域可燃冰试采完美结束[N]. *中国矿业报*, 2017-07-11.
Wu Hao. China wraps up the first marine combustible ice mining trial[N]. *China Mining News*, 2017-07-11.

Definition and thinking on natural gas hydrates reservoir

ZHANG Jinhua¹, WEI Wei¹, CHEN Longqiao², LIN Binbin², PENG Yong¹, XIAO Hongping¹

1. Department of Alternative Energy, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Langfang 065007, China

2. Drilling Engineering Division of CNPC, Tianjin 300280, China

Abstract Based on the definitions of unconventional gas reservoirs such as the tight gas, the shale gas and the coal bed methane, and the characteristics of the natural gas hydrate reservoir, the natural gas hydrate reservoir is defined as the natural gas hydrate accumulation with a certain amount of methane & other gases, migrated to appropriate strata with appropriate temperature and pressure, then stored in the formation/loose sediments in solid form, and the free gas accumulation directly associated with the natural gas hydrate accumulation. During the exploration and the evaluation of the natural gas hydrate resource, it is important to ascertain the free gas condition in the lower part of the natural gas hydrate accumulation. Characterized by the underlying free gas accumulation, the "solid-gas two-story-architecture style" natural gas hydrate reservoir is the current favorable exploitation target and the natural gas hydrate reservoir in Shenhu area is considered to be such kind of reservoir. When carrying out the resource evaluation and the test in the area, the natural gas hydrate accumulation and the free gas accumulation should be taken as a whole, which is expected to further improve the single well production and the economic benefits, promoting the exploration and the development of the natural gas hydrate.

Keywords natural gas hydrates reservoir; Shenhu area; exploration and evaluation; free gas; solid-gas two-story-architecture style ●



(责任编辑 刘志远)