

天然气水合物与传统油气资源 共生成藏模式初探

雷新华, 林功成, 苗永胜, 张新, 刘豪杰

(中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院)

摘要 天然气水合物与常规油气资源的成藏在时空上存在密切联系,在一定条件下可以共生成藏。存在泄漏共生、封盖共生和遮盖侧储三种基本的共生成藏模式。泄漏共生模式是先期形成了传统油气藏,而后由于发生油气泄漏并在其上方形成天然气水合物,其特征是在水合物的下方生、储、盖兼备;封盖共生模式则是先在上部形成天然气水合物,同时作为下部传统油气藏的盖层,其特征是水合物之下的传统油气藏具备生、储成藏条件,但缺乏盖层成藏要素;遮盖侧储模式是由于水合物矿藏的遮盖作用,迫使在下部形成的烃类物质向上运移时改道,在旁侧具成藏条件的邻区成藏。实际的地质成藏可能会出现这些基本模式的组合形式。

关键词 天然气水合物; 油气成藏; 成藏特征; 成藏模式; 共生成藏

中图分类号: TE112.3

文献标识码: A

天然气水合物是在 20 世纪后期发现的新型非常规能源,一般成藏于冻土带和海洋底部环境。国内外对这种非常规能源以及常规的油气资源各自的成藏模式已有较广泛的研究^[1-7],但对这两类资源成藏的内在联系及共生机制却研究极少。在漫长的地质历史演化中,天然气水合物与常规油气资源的成藏并非彼此完全孤立的,它们在时空上可能有联系,并且在一定条件下也可以共生成藏。

本文致力于在前人研究的基础上,进一步分析总结天然气水合物与常规油气资源共生成藏的模式及其动力机制。这种共生成藏模式对于未来能源开发利用可能会起到重要的作用,同时也有助于对天然气水合物和传统油气藏的分布规律及其类型进行合理的预测^[8]。

1 两类资源的成藏特征及要素分析

传统油气成藏的关键是油气的生成、运聚及保存等^[9]。其中,对油气生成的研究主要在其来源及类型上,不同来源和类型的油气,其成藏和分布规律也

有不同的特点,这对于油气勘探具有重要的现实指导意义。储集层和盖层是油气藏能够保存下来的两个基本要素,储集层的孔隙性和渗透率控制了储量和产能,而盖层可以降低油气的扩散散失,使其聚集成藏,这两者都是成藏的必要条件。油气运移是油气生成和聚集成藏的中间环节,运移规律的研究对于勘探开发十分重要。就目前而言,全球已探明的常规大油气田主要形成于被动边缘型和大陆裂谷型构造环境中^[10]。

相比于传统油气的成藏,天然气水合物成藏最直接的控制因素为温度和压力,对于海洋底部的水合物来说,构造活动、沉积变化、海水温度以及海平面升降等因素都是通过影响温度和压力从而影响水合物的生长或消融的。此外,海洋中水合物的形成和生长还取决于气体的组成、饱和度和沉积物的粒度大小、形状及组成等^[11]。在水合物富集成藏中,充足的气源是必要条件。同时还需要断裂系统、气烟囱、多边形断层或底辟等运移通道把气体运移至天然气水合物稳定带。

收稿日期: 2012-07-13; 改回日期: 2012-12-09

基金项目: 本文为国家自然科学基金委员会主任基金项目“中国南海北部天然气水合物与油气资源共生成藏模式研究”(编号: 41140038)成果

雷新华: 1961年生,教授,博士生导师。1982年毕业于西南石油学院地质专业,1988年获中国地质大学(北京)理学博士学位。主要从事海洋地质、天然气水合物方面的研究工作。通讯地址: 100083 北京市海淀区中国地质大学(北京)科研楼 1103; 电话: (010)82322219

据目前全球勘探研究所知,陆地上的天然气水合物主要存在于高纬度的永冻层中,而海洋上的天然气水合物主要赋存在北冰洋、大西洋、太平洋、印度洋等海域^[12-13]。据估计,全球 99% 的水合物存在于海底沉积物中,剩余的 1% 存在于陆地永冻层中,而且大多数天然气水合物赋存于近大陆边缘水深超过 500m、厚度达数百米的海底上部沉积地层中^[14-15]。

根据 Mann 等^[16]的观点,全球大型油气田分布可划分为 27 个聚集区。而根据笔者所查阅的资料和文献,表明其中的多个大型油气田聚集区内部或者邻近区域都存在水合物^[17-18]。比如北美地区的北坡油气聚集区和墨西哥湾油气聚集区,中南美地区的巴西油气聚集区,欧亚地区的北海油气聚集区和巴伦支海油气聚集区,非洲地区的西非油气聚集区,亚太地区的桑达油气聚集区、中国东海油气聚集区以及印度—巴基斯坦油气聚集区。在这些油气聚集区内或附近(或根据研究资料推测)均有天然气水合物存在。因此,可以说这些地区的传统油气藏与水合物之间势必存在着某种联系。

本文试图以海底的天然气水合物作为探讨对象,分析总结它与传统油气资源的共生组合关系,这对于在海洋中同时勘探这两类资源可能具有重要的意义。

2 共生成藏模式分析

目前,对于天然气水合物与传统油气资源的共生成藏,科学家们尚无深入的探讨,国内外也都还缺少相关的研究,但也有一些学者对两者之间的关系进行了一些论述^[19-22]。

笔者主要从形成演化的角度把天然气水合物与传统油气藏的共生成藏模式分为三种基本类型,即泄漏共生模式、封盖共生模式和遮盖侧储模式。

2.1 泄漏共生模式

在早期,深水—半深水湖相、浅海相、三角洲等沉积,在底部形成烃源岩,在有合适的储层、盖层条件下,形成早期的构造或岩性油气藏(传统油气藏)(图1a)。

由于某些原因,油气藏内的压力增高,导致油气藏盖层在一些薄弱处产生压力释放口,油气向外散失^[23-24],向上运移的气体在适宜的条件下就有可能形成天然气水合物(图1b)。

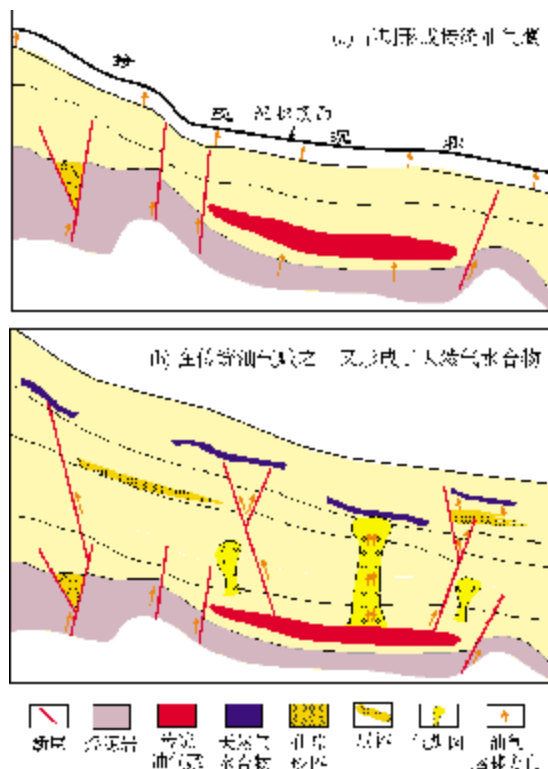


图1 天然气水合物与传统油气资源的泄漏共生成藏模式示意图

泄漏共生模式主要从游离气的角度进行分析,发现天然气水合物与传统油气的运移通道、排驱动力都相似。在这种模式中,天然气水合物与传统油气藏共有相同的烃源岩,而且后者又成了在其上方的天然气水合物的气源。关于这种模式,国内外一些学者有过如下一些与此相关的成藏方面的讨论。

(1) Sassen 等^[25]1999 年认为大量源自深部油气体系的气体运移至天然气水合物稳定带,并形成稳定的水合物层。

(2) Chen Zhuoheng 等^[26]2009 年针对加拿大 Beaufort-Mackenzie 盆地,分析了 250 口石油勘探井的众多测井曲线,对于盆地中甲烷水合物产出的地质控制因素和资源潜力提出了新的见解,认为传统石油体系对于盆地中甲烷水合物的聚集起着基础性的控制作用。

(3) 吴时国等^[27]2010 年根据南海北部深水盆地的渗漏系统探寻天然气水合物与油气成藏关系,发现白云凹陷存在大量的气烟囱、活动断裂、深水水道及海底滑坡等构造,这些构造使油气藏发生了大量的流体渗漏,形成了构造渗漏型水合物。

(4)何家雄等^[28]2010年通过对南海准被动大陆边缘深水盆地的研究,发现海底天然气水合物与深部油气在空间上具有叠置关系,在气源构成及通道方面关系紧密。

由此可见,天然气水合物与传统油气的泄漏共生藏模式具有较普遍意义。

2.2 封盖共生模式

由于早期地层拉伸或挤压、海底滑坡、岩石物质间密度倒置,形成断层、裂缝及底辟等,为气体向上运移提供了通道,或者区域抬升,层压降低,游离气通过分子扩散、渗流而向上运移,在满足相平衡条件下在海底形成了天然气水合物(图2a)。

天然气水合物稳定带对其底界以下的游离气或油气有封存作用。在漫长的地质历史中随着压力降低或温度上升可导致稳定带底界向上位移;同样,在下方游离气充足的情况下,压力升高或温度下降可导致稳定带底界向下位移^[29]。上覆的天然气水合物是一种有效盖层,当岩层中天然气水合物的饱和度超过50%时,它对于气体的渗透率已几乎为0。水合物封闭住油气的运移,构成了对下部储集体的盖层,从而在其下方形成新的油气藏。如图2b所示,在天然气水合物I和II的封堵下,原先无法成藏的1号和2号砂体形成了岩性和断层封堵油气藏,而3号砂体由于没有上覆的水合物封堵条件,所以无法成藏。此外,天然气水合物的平衡压力很低,其物理性质相当稳定,这使得它具有很好的分布稳定性,可以不受长期活动断层的影响而对其下方形成的油气起到持续的封盖作用^[7,30]。

封盖共生模式主要从空间成藏角度进行研究,通过对垂向的储盖分析,发现天然气水合物与传统油气藏不仅能促进相互成藏,而且通过分析游离气以及天然气水合物自身独特的物理性质,发现水合物对维持油气成藏、免受构造作用破坏等方面也有一定的作用。这种模式在国内外也已有一些探讨。

(1)MacDonald等^[31]1994年发现墨西哥湾北部区域存在大规模的油气渗漏,研究认为,先是渗漏的气体向海底聚集形成天然气水合物,并对下部油气产生封盖作用,阻止油气继续渗漏。当作为盖层的水合物由于下部气体浮力增大而裂解并移开时,又或者由于温度高于稳定带界限而分解时,在其之下聚集的油气又会发生逃逸。

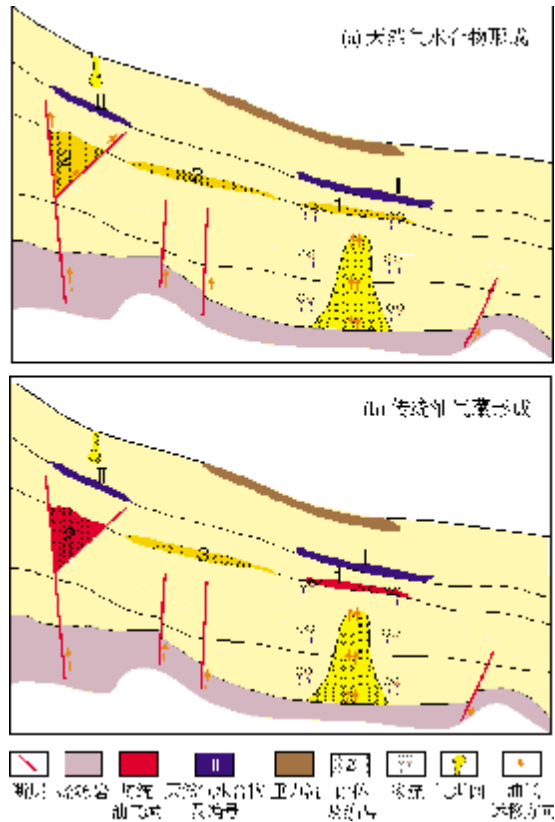


图2 天然气水合物与传统油气资源的封盖共生
成藏模式示意图

(2)Grauls等^[32-33]2001年在文章中阐述了天然气水合物在油气勘探方面的重要性,认为它是一个很好的盖层,大量的气体在某种情形下可以圈闭在水合物稳定带底界或者BSR(似海底反射层)之下。同时,BSR在他们看来还是直接的烃指示,表明了在水合物赋存的时间内,深部的油气体系已经处于活跃状态。因此,天然气水合物和含气的水合物圈闭可以用于指导深部油气勘探。

2.3 遮盖侧储模式

下部生成的油气,其中含有甲烷等气体,经断层、裂缝或以底辟等方式向上运移至具有适宜温压条件的位置,形成水合物(图3a)。

随着时间的推移,水合物范围逐步扩大直至稳定,在其下部,不断生成的油气持续供应聚集,压力不断增大,此时,若邻区存在常规的储盖条件,那么被上部水合物封堵的油气在压力驱动下通过裂缝、多边形断层等侧向运移通道就可能在邻区成藏。如

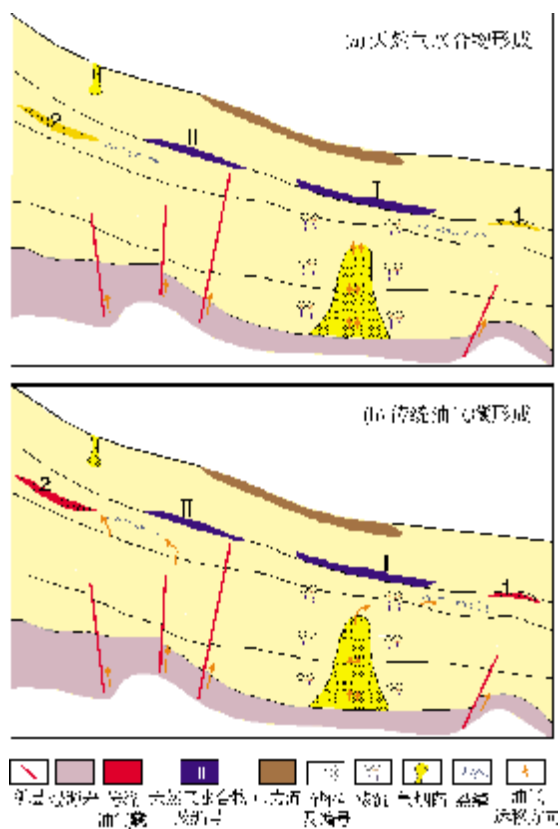


图3 天然气水合物与传统油气资源遮盖侧储共生
成藏模式示意图

图3b所示,受天然气水合物 I 和 II 的遮盖,游离气向砂体1和砂体2运移,分别形成了构造和岩性油气藏。

在这种模式中,水合物稳定带所起的遮盖作用,可以是短时的,也可以是长期的。也就是说,在水合物层的遮盖下油气运移至邻近区域成藏,后期由于构造运动等,水合物因稳定条件破坏而分解,致使其遮盖作用消失,但邻区因具有适宜的储盖条件,已经聚集的油气藏仍能够得以保存下来,这与前两种模式有着显著的差别。

关于遮盖侧储模式,支家生^[34]的研究具有重要的参考意义。他通过对台西南海域的研究,认为在大量水合物的封盖作用下,海底沉积物中大量的生物甲烷沿断层侧向运移,从而在邻近区域孔渗性良好的砂坝或障壁礁滩中聚集成藏,形成建峰等海域气田和官田等台南陆上气田。

3 讨论

对泄漏共生模式(模式一)来说,深部烃源岩产

生的烃类物质经通道运移至储盖条件适宜的地层形成常规油气藏。在构造发育的区域,由于地层活动或者岩石物质间密度倒置,可形成沟通浅层的断层或底辟构造;在构造不发育的地区,在沉积、成岩、不均衡压实等作用下,可形成微裂隙、岩石孔喉、层理面、不整合面等油气潜在运移通道^[35]。随着地质演化,因构造挤压、不均衡压实、矿物沉淀、地层沉降等作用会造成孔隙体积的减少,以及(或)持续生烃作用及温度上升等会造成流体体积增加膨胀,致使油气藏异常超压,并在薄弱环节处产生压力释放口^[36-37]。在流体势差的作用下,从油气藏中渗漏泄出的游离气在分子力、毛细管力、浮力等驱动下,向上渗流或扩散,当运移至温压适宜的海底浅层时就会形成天然气水合物,在源源不断的气体供应下,就可形成水合物矿藏。

泄漏共生模式的特征在于,它是先形成了传统的油气藏,而后在其上方形成天然气水合物,在水合物的下方具备传统油气藏的各种要素,包括烃源岩、储集岩以及盖层,也就是生储盖齐备。

封盖共生模式(模式二)是,早先形成的天然气水合物,其气体主要源自于下方烃源岩所生成的甲烷等小分子,借由断层、裂缝或底辟等运移通道,在上部形成水合物矿藏。这样所形成的水合物又反过来对下部继续生成的油气产生封盖作用,当储集条件适宜时,被封堵的烃类物质就可以聚集成为传统油气藏。

封盖共生模式的特征是由上部的天然气水合物作为下部传统油气藏的盖层,两类油气资源共享同一套烃源岩,水合物之下的传统油气藏本身不具备完整的成藏要素,它缺乏油气盖层,而是由在其上方的天然气水合物来弥补这一缺陷,这是它区别于模式一的主要之处。

遮盖侧储模式(模式三)是由于水合物矿藏的遮盖作用,迫使在下部继续形成而向上运移的烃类物质遇到水合物盖层后改道,发生侧向运移,并在邻区具有适宜储盖条件的地方形成传统油气藏。在这种情况下,若后期由于条件改变,水合物矿藏会发生移动或者水合物被分解为气体而逸散,但已经在侧向形成的传统油气藏一般不太容易直接随之而被破坏,这一点与模式一和二均有较大的差别。

遮盖侧储模式的特点在于天然气水合物对其下方的油气不构成有效的盖层,只是对油气的运移产

生遮挡改道作用。还有,在模式一和模式二中,均需要在天然气水合物的下方具备良好的储层,而在模式三中,可以缺失这种储层。

笔者认为,如果水合物对下方的油气资源具有半封闭性质,同时又具备侧向储集的条件,此时完全有可能出现模式一和模式三的结合,或者是模式二和模式三的结合,因而会出现天然气水合物与传统油气藏共生成藏的更复杂形式。本文在此暂不作更多讨论。

天然气水合物的存在大大提高了海底浅层的封盖能力,它可把原本很弱或根本没有封闭能力的地层有效地转变为盖层,大大提高深部传统油气聚集成藏的可能性。从上述三种模式的地质特征来看,天然气水合物和传统油气藏两类烃资源形成共生关系的条件在海洋中是普遍存在的,因此所述的共生成藏模式具有普遍意义,它们将可为深化海洋油气勘探做出积极贡献。

4 结 语

天然气水合物与传统油气藏存在三种基本的共生成藏模式,即泄漏共生模式、封盖共生模式以及遮盖侧储模式。

天然气水合物与传统油气藏共生成藏模式的研究对丰富油气成藏与勘探理论具有重要的科学探索意义,这不仅可拓宽资源的勘探领域和规模,而且还可为天然气水合物与传统油气资源的勘探与评价提供新的视角。本文所建立的三种共生成藏模式属于基本模式,实际情况可能会相对复杂,这些模式的正确性、有效性以及普遍性等均还有待于进一步的勘探实践来予以检验。

参 考 文 献

- [1] 吴冲龙,林忠民,毛小平,等.“油气成藏模式”的概念、研究现状和发展趋势[J]. 石油与天然气地质,2009,30(6):673-683.
- [2] Grevemeyer I, Villinger H. Gas hydrate stability and the assessment of heat flow through continental margins[J]. Geophysical Journal International, 2001, 145(3):647-660.
- [3] Chapman N R, Pohlman J W, Cofin R B. Thermogenic gas hydrates in the northern Cascadia Margin [C]. EOS Transactions, American Geophysical Union, 2004(85):361-365.
- [4] Trehu A M, Ruppel C, Holland M, et al. Gas hydrates in marine sediments: Lessons from scientific ocean drilling[J]. Oceanography, 2006, 19(4):124-142.
- [5] 吴能友,张海启,杨胜雄. 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.
- [6] 于兴河,张志杰,苏新,等. 中国南海天然气水合物沉积成藏条件初探及其分布[J]. 地学前缘, 2004, 11(1):311-315.
- [7] 樊栓狮,关进安,梁德青. 天然气水合物动态成藏理论[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(6):819-826.
- [8] 王翠苹,宋之光. 墨西哥湾含水合物和油气渗漏区海底表层沉积物中有机质饱和烃组成分布特征研究[J]. 地球化学, 2007, 36(1):62-70.
- [9] 郭小文,何生. 伊通盆地天然气成因类型与成藏[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3):260-267.
- [10] 李晶,孙婧,陶明信. 全球油气探明储量与大油田的分布及地质构造背景[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(2):259-267.
- [11] Clennell M B, Hovland M, Booth J S, et al. Formation of natural gas hydrates in marine sediments: Conceptual model of gas hydrate growth conditioned by host sediment properties [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(22):985-998.
- [12] 吴茂炳,王新民,李在光. 天然气水合物的形成分布特征及其开发前景[J]. 中国石油勘探, 2003, 8(2):75-78.
- [13] 葛倩,王家生,向华,等. 天然气水合物资源量研究进展[J]. 海相油气地质, 2005, 10(4):47-50.
- [14] 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 and Engineering, 2007, 56(1/3):14-31.
- [15] Ryo Matsumoto, Ryu Byong-Jae, Lee Sung-Rock, et al. Occurrence and exploration of gas hydrate in the marginal seas and continental margin of the Asia and Oceania region [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(10):1751-1767.
- [16] Mann P, Gahagan L, Gordon M B. Tectonic setting of the world's giant oil and gas fields [M]. AAPG Memoir, 2003.
- [17] Council of Canadian Academies. Energy from gas hydrates: Assessing the opportunities and challenges for Canada [EB/OL]. [2009-06-12] <http://www.sciencetradvice.ca/hydrates.html>.
- [18] United States Geological Survey. Gas hydrates and climate warming [EB/OL]. [2012-03-31] http://www.usgs.gov/blogs/features/usgs_science_pick/gas-hydrates-and-climate-warming/.
- [19] Kvenvolden K A. A review of the geochemistry of methane in nature gas hydrate[J]. Organic Geochemistry, 1995, 23(11/12):997-1008.
- [20] Hyndman R D, Dallimore S R. Natural gas hydrate studies in Canada[J]. CSEG Recorder, 2001, 26:11-20.
- [21] 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.
- [22] 朱岳年,史卜庆. 天然气水合物对油气藏聚集与保存的控制作用[J]. 天然气工业, 2000, 20(3):38-40.
- [23] 陈绥祖,曾恕蓉. 封存箱与上三叠统天然气成藏模式[J].

- 天然气工业, 1994, 14(5): 24-27.
- [24] 周兴熙. 封存箱与油气成藏作用[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 609-616.
- [25] Sassen R, Sweet S T, Milkov A V, et al. Thermogenic vent gas and gas hydrate in the Gulf of Mexico slope: Is gas hydrate decomposition significant[J]. *Geology*, 1999, 29(2): 107-110.
- [26] Chen Zhuoheng, Osadetz K G. Geological controls of regional petroleum gas hydrate occurrence, Beaufort -Mackenzie Basin, Canada[M]. AAPG Annual Convention and Exhibition, 2009.
- [27] 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.
- [28] 何家雄, 颜文, 马文宏, 等. 南海准被动陆缘深水油气与水合物共生意义[J]. 西南石油大学学报, 2010, 32(6): 5-10.
- [29] 支家生. 天然气水合物与油气藏形成——兼谈我国古老地台区的油气勘探[J]. 石油实验地质, 2009, 31(1): 50-53.
- [30] 于兴河, 张志杰, 苏新, 等. 中国南海天然气水合物沉积成藏条件初探及其分布[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 311-315.
- [31] MacDonald I R, Guinasso N L, Sassen R, et al. Gas hydrate that breaches the sea floor on the continental slope of the Gulf of Mexico[J]. *Geology*, 1994, 22(8): 699-702.
- [32] Grauls D. Gas hydrates: Importance and applications in petroleum exploration[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(4): 519-523.
- [33] Grauls D, Blanche J P, Poudre J L. Hydrate sealing efficiency from seismic AVO and hydromechanical approaches [C]//Proceeding of the International Symposium on Methane Hydrates: Resources in the Near Future? 1998: 20-22.
- [34] 支家生. 天然气水合物在油气藏形成过程中的封盖作用——谈造山带中烃源岩对盆地地区油气资源的贡献[J]. 海相油气地质, 2009, 14(1): 77-78.
- [35] 宋岩, 夏新宇, 洪峰, 等. 前陆盆地异常压力特征与天然气成藏模式[J]. 科学通报, 2002, 47(1): 70-76.
- [36] 王红军, 黄晓明. 塔中地区地层压力结构与油气的分布[J]. 石油实验地质, 1999, 21(3): 242-245.
- [37] 姜子昂, 熊鹰, 段玲. 川南地区隐伏裂缝系统成藏模式及勘探前景[J]. 成都理工学院学报, 1996, 23(增刊): 80-87.

编辑: 吴厚松

Accumulation Coexistence Models of Natural Gas Hydrate and Conventional Hydrocarbon: An Approach

Lei Xinhua, Lin Gongcheng, Miao Yongsheng, Zhang Xin, Liu Haojie

Abstract: Natural gas hydrate may be closely related with conventional hydrocarbon resources in time and space. In some appropriate conditions, natural gas hydrate can accumulate along with or coexist with conventional hydrocarbon in relative reservoirs. On the base of this research, three kinds of basic accumulation coexistence models are suggested, which are the leaking accumulation, the capping accumulation and the capping side-accumulation coexistence models. The Leaking accumulation coexistence model means that conventional hydrocarbon has accumulated first in lower reservoirs and then leaks up to form gas hydrate in upper reservoirs, which is characteristic of a complete source-reservoir-caprock assemblage under the gas hydrate reservoirs. The capping accumulation coexistence model refers that gas hydrate accumulates in upper reservoirs and meanwhile the gas hydrate reservoirs act as the cap rocks of the lower conventional hydrocarbon reservoirs, which is characterized by a nice source-reservoir assemblage but lack of cap-sealing condition. The capping side-accumulation coexistence model implies that due to covering of the upper gas hydrate reservoirs, the lower hydrocarbon has been barriered as it migrate up and accumulate side away into the adjacent reservoirs. Actual hydrocarbon accumulation may be any assembled pattern among these models.

Key words: Gas hydrate; Hydrocarbon accumulation; Reservoir characteristics; Accumulation model

Lei Xinhua: male, Professor. Add: Institute of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China