

西沙海域南部天然气水合物发育特征及成藏模式

杨涛涛, 吕福亮, 王彬, 杨志力, 鲁银涛, 孙国忠

(中国石油杭州地质研究院)

摘要 根据新的三维地震资料,在西沙海域南部发现的天然气水合物具有三个主要地震识别标志:(1)似海底反射现象明显,表现为强振幅强连续反射、与海底反射极性相反、与海底近平行及有穿层现象等四个特征;(2)具有空白反射带,且与似海底反射伴生;(3)随偏移距增加,振幅明显增强。研究区天然气水合物平面上具有分块展布的特点,单块内水合物中部富集、向周缘丰度减小。估算水合物稳定带厚度约为120m。通过地质类比研究认为,西沙海域南部天然气水合物成藏主要受气源条件、温度-压力条件和构造-沉积条件三个因素共同控制。据此建立了研究区天然气水合物的成藏模式。

关键词 南海;西沙海域;天然气水合物;地震特征;控制因素;成藏模式

中图分类号: TE122.3¹

文献标识码: A

天然气水合物(俗称可燃冰,以下简称水合物)是一种新型能源,其资源量十分丰富,据估算,全世界水合物的能源储量为已发现油气的能源储量的2倍左右,其中97%的水合物分布在深水海域(水深大于500m),陆上高纬度极地区和永久冻土带中也有少量分布^[1-4]。水合物与常规油气藏的形成保存有着一定的联系^[5],它对环境 and 钻井工程安全也有着重要影响^[3-6]。

近年来,国内外学者对南海水合物的形成机理、资源潜力、地球物理识别标志、分布特征及主控因素等开展了大量研究^[7-10],其中东沙海域因具备优越的水合物发育地质条件,故相关研究也最深入^[11-13],已落实了多个水合物富集区,并于2007年钻井,成功采集到了水合物实物样品。已有的地质类比研究认为,西沙海域的西部和北部(琼东南盆地)也发育有水合物^[12-14],而对南部的水合物发育情况则暂无报道。本文基于近年新的三维地震资料,在西沙海域南部(中建南盆地)发现了水合物发育的地震标志,并初步落实了其空间分布,通过地质类比分析了水合物成藏的主控因素,构建了成藏地质模式,以期对西沙海域

油气地质研究提供帮助。

1 地质背景

南海位于欧亚板块、太平洋板块和印度—澳大利亚板块三大板块交汇处,经历了复杂的地质演化过程,发育有陆缘裂谷盆地、走滑盆地、前陆盆地和大洋盆地等四大类盆地^[15],蕴含了丰富的油气资源^[15-16]。南海的扩张和演化是太平洋板块向欧亚板块俯冲以及印度—澳大利亚板块与欧亚板块碰撞所共同作用的结果^[17-19],它经历了陆缘张裂和海底扩张两大构造阶段和陆相—海陆过渡相—海相的沉积环境演化过程^[19]。

西沙海域位于南海北部,经历了古新世—渐新世裂陷成盆和中新世以来的热沉降两个构造演化阶段,具有“下断上拗”双层结构,即下构造层代表古近纪裂陷阶段,上构造层为新近纪—第四纪拗陷阶段^[20-21]。下构造层具断陷作用形成的半地堑或地堑充填特征、以及多凸多凹的构造格局,以近源沉积为主,沉积物较粗,充填了渐新统崖城组、陵水组,属河湖相—海陆过渡相含煤沉积及半封

收稿日期: 2013-09-22; 改回日期: 2014-01-26

本文受国家重点基础研究发展计划(973计划)课题《南海深水盆地生物礁碳酸盐岩台地成因机理研究》(编号:2009CB219406)和国家科技重大专项《西沙海域油气地质综合研究及有利勘探区》(编号:2008ZX05025-004)共同资助

杨涛涛: 1981年生,硕士,工程师。从事海域油气勘探与综合评价工作。通讯地址: 310023 浙江省杭州市西溪路920号; 电话: (0571)85229302; E-mail: yangtt_hz@petrochina.com.cn

闭浅海相沉积。上构造层为拗陷期沉积,具有中部高、四周低、且被大型凹陷所包围的构造格局,无大型河流供给,为远源海相沉积,充填了中新统三亚组、梅山组、黄流组、上新统莺歌海组及第四系乐东组^[22-23]。地质分析表明西沙海域具备水合物发育所需的地质条件^[10-14]。

本次研究区位于西沙海域南部的中建南盆地(图1),水深大于1000m,属深水区。

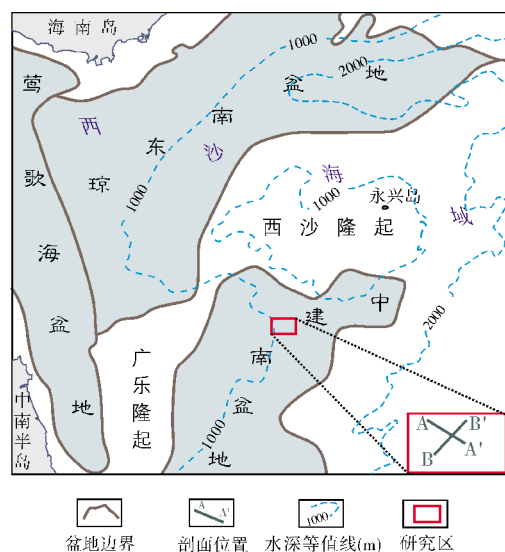


图1 西沙海域及研究区位置

2 天然气水合物的地震识别

水合物在地震剖面上主要有三种标志^[2-13]:(1)似海底反射层(bottom simulating reflector,简称BSR), (2)空白反射带(blanking zone,简称BZ), (3)振幅随偏移距变化(amplitude versus offset,简称AVO)。这些典型特征亦见于本次研究区。

2.1 BSR特征

BSR是识别水合物最重要的一个地球物理标志。南海的水合物在地震剖面上的一个重要特征是发育BSR,它代表着水合物稳定带的底界面,其下伏沉积地层常常含有一定量的气体^[2]。研究区的BSR具有四个明显的地震反射特征:强振幅强连续、与海底极性相反、与海底近平行、以及有穿层现象(图2a)。

在BSR之上,水合物的地震速度和密度较高,

阻抗较大,而下伏地层因受水合物层遮盖常含有气体,这导致了下伏地层的地震速度和密度降低,阻抗较低,因此在水合物稳定带与下伏地层之间就形成了明显的波阻抗界面,表现为强振幅、强连续反射。

地震反射波从海水传播到沉积地层中,是从低阻抗水到高阻抗地层中,为正极性反射,而地震波从水合物传播到下伏地层中,是从高阻抗介质到低阻抗介质中,为负极性反射,因此BSR与海底的极性相反。

在一定区域内,若地质条件相似,则水合物稳定带底部的深度相当,故表现为BSR与海底近平行。从成因机制上看,因BSR是受温度-压力条件控制的,而地层是对构造沉积条件的响应,两者的控制因素不同,故也会出现BSR穿层现象。

2.2 BZ特征

地震剖面上,BZ常与BSR伴生,且位于BSR之上。由于水合物的固结作用,赋存水合物的层段,其密度、速度差异很小,可认为接近均质地层而无明显的波阻抗界面,因此地震反射为弱反射甚至是空白反射(图2b)。

2.3 AVO特征

国外学者较早应用AVO技术进行水合物正演、反演、含量估算等工作,Ecker^[24]给出了BSR界面的AVO变化曲线图版,考虑到反射系数的不同,会出现两种情形:第一种情形,BSR界面上覆水合物沉积层段,下伏地层为海相沉积,上覆地层泊松比小于下伏地层泊松比,在BSR处出现振幅绝对值随角度增大(当偏移距增加时角度增加)而减小的现象;第二种情形,BSR界面上覆介质为水合物沉积层,下伏介质含游离气,上覆地层泊松比大于下伏地层泊松比,在BSR处出现振幅绝对值随角度增大而增大的现象。

国内学者^[8,25]以西沙海域北部实际地震资料为基础,用海水和海底的物理参数进行AVO正演,得到各道的校正因子后对叠前道集进行校正,所得结论与Ecker的相似,即游离气含量越高,振幅绝对值随偏移距增加而增加的特征越明显。西沙海域南部与北部的地质条件相似,水合物发育情况可类比,

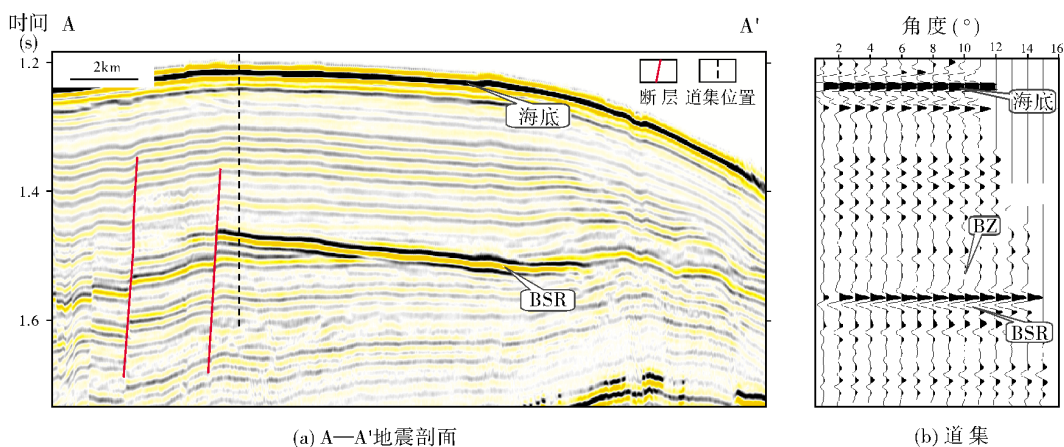


图 2 研究区过 BSR 的地震剖面 and 地震道集

BSR 似海底反射层; BZ 空白反射带

A—A'剖面位置见图 1

BSR 处的 AVO 特征也一致, 都出现了振幅绝对值随偏移距加大而增大的现象(图 2b)。

3 天然气水合物分布特征

3.1 天然气水合物稳定带厚度估算

研究区的水合物稳定带分布在上新统一更新统。本文将使用广泛认可的海底温度、热导率、热流和温度压力等条件参数计算稳定带厚度, 由于目前研究区内尚无钻井资料, 经验公式中参数的选取参考了前人的研究成果, 并考虑到地质条件的差异而略作了调整, 估算出的稳定带厚度约为 120 m。具体过程分三步:

海底温度估算 南海北部实测海水温度与深度之间具有明显的相关关系, 因此研究区也采用海水深度来求取海底温度^[26]。

$$\text{Ind} = -1.3361 \times \text{Int} + 2.0339 \quad (1)$$

式中: d —— 海水深度, km;

t —— 海底温度, °C。

结果 t 为 4.6 °C。

BSR 处温度估算 应用 Dickens 公式^[27]计算。

$$1/T = 3.79 \times 10^{-3} - 2.83 \times 10^{-4} \lg P \quad (2)$$

式中: T —— BSR 处温度, K;

P —— 静岩压力, MPa。

结果研究区内 BSR 处地层温度为 16.3 °C(摄氏度由

开尔文温度换算得到)。

按经典的 Gradner 方程, 沉积物的体密度与深度(从海底起算)之间呈明显的相关性, 为提高计算精度, 这里采用沉积物的体密度代替了沉积物平均体密度以求取静岩压力^[26]。

水合物稳定带厚度估算 根据稳定带厚度与热流、海底温度、BSR 处温度及热导率之间的关系来估算稳定带厚度^[14]。

$$Z = k(T - t) / H \quad (3)$$

式中: Z —— 稳定带厚度, m;

k —— 热导率, W/(m·K);

T —— BSR 处温度, K, 由公式(2)求得;

t —— 海底温度, °C, 由公式(1)求得;

H —— 大地热流, mW/m²。

根据前人的研究^[6, 28], 选取西沙海域热导率和大热流分别为 0.9 W/(m·K) 和 85 mW/m², 联立上述三个公式, 估算研究区水合物稳定带厚度约为 120 m。

3.2 天然气水合物平面分布特征

以 BSR 地震特征为基础, 基于自动追踪技术, 可刻画水合物的平面分布。BSR 是识别水合物最重要的地震标志, 特别是强振幅、强连续反射特征, 易于自动追踪。层位自动追踪是利用相邻地震反射波形、振幅、相位或连续性等特征, 以一种或多种属性为基础, 利用计算机快速地识别地质体, 它具有结果客观、效率高的优点。

在提取的 BSR 振幅图(图 3)上,区内水合物总体呈北西—南东方向块状展布,单块内振幅分布具有中部强、向四周减弱的特点,反映了中部水合物富集、向四周减少的特点。分析认为这可能是受如下因素影响:一是工区内发育气烟囱,其内部含气破坏了地震反射的连续性,将水合物分割成块状分布;二是水合物富集程度有差异,中部的水合物最富集,与下伏地层之间的波阻抗差异最大,故表现为强振幅反射,而向四周水合物逐渐减少,上下地层间波阻抗差异变小,因此表现为弱地震反射;三是断层对水合物的发育也起到控制作用,水合物富集区的断裂较发育。需要说明的是,图 3 中北西—南东向直线条带是采集脚印,即采集时各条线的能量差所造成,与水合物分布情况无关。

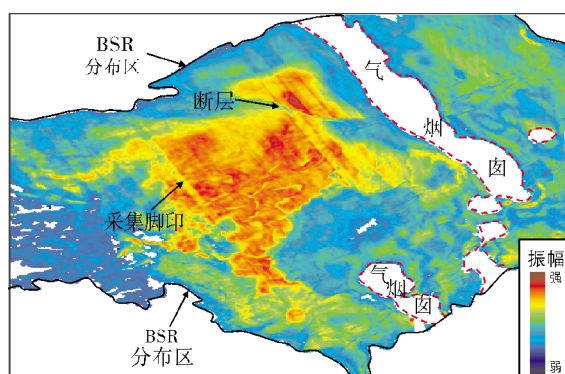


图 3 研究区 BSR 振幅分布图

4 天然气水合物成藏的主控因素及地质模式

4.1 主控因素

水合物成藏受气源、温度-压力条件和构造-沉积条件等多种因素控制。

4.1.1 气源条件

水合物主要气源为深部热解气和原地生物气。由于西沙海域新近纪以来处于隆起构造背景,无大型河流供给,浅层沉积物中有机质含量较少,因此原地生物气潜力有限。西沙海域西部和北部(琼东南盆地)古近系烃源岩发育,其中渐新统海陆过渡相含煤泥岩是优质烃源岩,TOC 值 0.16%~81.3%^[29]。经地质类比后认为,西沙海域南部渐新

统海陆过渡相含煤泥岩应是水合物的主要气源。西沙海域地温梯度高,平均达 $4.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ^[30],这一方面使烃源岩成熟门限深度变浅,加速了下部烃源岩层系中有机质的成熟及向烃类转化;另一方面随着烃类排出及液态烃类裂解,形成的异常高压可为油气运移提供动力。

研究区的地震资料揭示,上构造层(三亚组—乐东组)断层发育,并且与下构造层断层连接(图 4),这为油气向上运移提供了通道。

4.1.2 温度-压力条件

水合物是一种固态化合物,其发育受温度和压力的共同控制,要求具备低温和高压条件。海底温度越低,水合物稳定带的厚度就越大,反之则越小;地温梯度越大,水合物埋深就会越浅,厚度也会越薄,反之则厚度越大;水深越大,水合物稳定带可能越厚,反之则越薄^[10]。前人研究^[10-14]表明,西沙海域西部和北部水合物发育。经类比后认为,西沙海域南部具有相似的地质条件和相似的海域温度-压力条件,水合物也同样可能发育。王宏斌等^[26]通过实际数据计算认为,南海北部陆坡区地层温度 $14\sim 20^{\circ}\text{C}$ 、压力 $5\sim 20\text{MPa}$ 的条件最适合水合物发育。本文通过估算获得,西沙海域南部 BSR 处地层温度为 16.3°C 、压力为 10.2MPa ,此温压条件也较适合水合物发育。

4.1.3 构造-沉积条件

研究区处于构造相对高部位(图 4),是油气运移的有利指向区,易于形成水合物。

高沉积速率区易于形成欠压实带,产生足够的孔隙空间,从而利于水合物的形成^[1]。西沙海域自中新世以来进入热沉降阶段,特别是上新世以来进入快速热沉降阶段,根据地震资料估算,沉降速率为 $0.12\sim 0.22\text{m/ka}$,沉积物压实不充分,孔隙空间发育且包含水,有利于水合物发育^[26]。

4.2 成藏模式

本次研究以实际地震资料为基础,考虑到西沙海域的地质特征,建立了本区水合物的成藏模式:下部古近系烃源岩生成的油气,沿断裂向上运移至构造相对高部位,在合适的温度-压力条件下形成了水合物的聚集(图 4)。

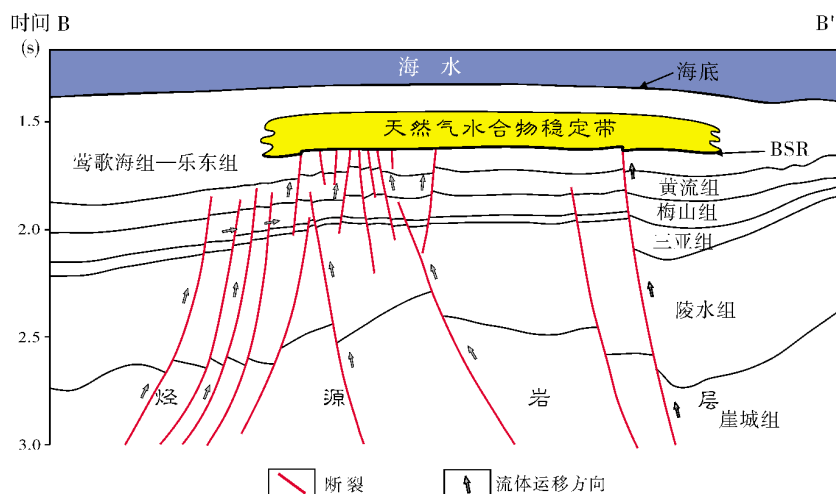


图 4 研究区水合物成藏模式图

B—B'剖面位置见图 1

5 结 论

(1) 西沙海域南部的天然气水合物具有三个主要地震识别标志: 似海底反射层 (BSR) 明显, 表现为强振幅强连续反射、与海底反射极性相反、与海底近平行及有穿层现象等四个特征; 空白反射带位于 BSR 之上, 两者常常伴生; BSR 处振幅绝对值随偏移距增加而明显增强。

(2) 研究区的天然气水合物纵向上具有一定厚度, 根据经验公式估算稳定带厚度约为 120 m; 平面上具有分块特点, 且单块内水合物中部富集、向周缘丰度减小。

(3) 天然气水合物成藏受气源、温度-压力条件和构造-沉积条件共同控制, 依据实际地震资料建立了研究区天然气水合物的成藏模式。

参 考 文 献

- [1] MILKOV A V, SASSEN R. Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces[J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19(1): 1-11.
- [2] SHIPLEY T H, HOUSTON M H, BULLER R T, et al. Seismic evidence for wide spread possible gas hydrate horizons on continental slopes and margins[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(12): 2204-2213.
- [3] 刘影, 史晋. 天然气水合物勘探技术综述[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2004, 40(6): 984-992.
- [4] MAKOGON Y F. Natural gas hydrates: A promising source of energy[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2010, 2(1): 49-59.
- [5] 雷新华, 林功成, 苗永胜, 等. 天然气水合物与传统油气资源共生模式初探[J]. 海相油气地质, 2013, 18(1): 47-53.
- [6] 徐行, 何家雄, 何丽娟, 等. 南海北部与南部新生代沉积盆地热流分布与油气运聚富集关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(6): 99-108.
- [7] 吴必豪, 张光学, 祝有海, 等. 中国近海天然气水合物的研究进展[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 177-189.
- [8] 文鹏飞, 张宝金. 利用 AVO 研究西沙海槽水合物与 BSR 的对应关系[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 277-281.
- [9] 祝有海, 张光学, 卢振权, 等. 南海天然气水合物成矿条件与找矿前景[J]. 石油学报, 2001, 22(5): 6-10.
- [10] 魏伟, 张金华, 魏兴华, 等. 我国南海天然气水合物资源潜力分析[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(6): 2646-2655.
- [11] 王宏语, 孙春岩, 张洪波, 等. 西沙海槽潜在天然气水合物成因及形成地质模式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(4): 85-91.
- [12] 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.
- [13] 宋海斌, 耿建华, WANG H K, 等. 南海北部东沙海域天然气水合物的初步研究[J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 687-695.
- [14] 王秀娟, 吴时国, 董冬冬, 等. 琼东南盆地块体搬运体系对天然气水合物形成的控制作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(1): 109-118.
- [15] 王建桥, 姚伯初, 万玲, 等. 南海海域新生代沉积盆地的油气资源[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(2): 91-100.
- [16] 姚伯初, 万玲, 刘振湖. 南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源[J]. 地球科学, 2004, 29(5): 543-549.
- [17] 夏斌, 崔学军, 谢建华, 等. 关于南海构造演化动力学机制

- 研究的一点思考[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(3): 221-227.
- [18] 姚伯初. 南海盆地的新生代构造演化史[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(2): 1-13.
- [19] 闫义, 夏斌, 林舸, 等. 南海北缘新生代盆地沉积与构造演化及地球动力学背景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(2): 53-61.
- [20] 陶维祥, 赵志刚, 何仕斌, 等. 南海北部深水西区石油地质特征及勘探前景[J]. 地球学报, 2005, 26(4): 359-364.
- [21] 李绪宣, 朱光辉. 琼东南盆地断裂系统及其油气输导特征[J]. 中国海上油气, 2005, 17(1): 1-7.
- [22] 龙根元, 吴世敏, 曾广东. 琼东南盆地北礁凹陷伸展构造的几何学分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(3): 71-77.
- [23] 杨涛涛, 吴敬武, 王彬, 等. 琼东南盆地华光凹陷构造特征及沉积充填[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(5): 13-18.
- [24] ECKER C. Seismic characterization of methane hydrate structures[D]. Stanford University, 2001.
- [25] 牛滨华, 文鹏飞, 温宁, 等. 基于 BSR 的 AVO 正演估算水合物含量方法的研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 143-152.
- [26] 王宏斌, 黄永祥, 梁劲, 等. 南海北部陆坡坳陷断裂带中水合物赋存的温压场环境[J]. 现代地质, 2006, 20(1): 103-108.
- [27] DICKENS G R, QUINBY-HUNT M S. Methane hydrate stability in seawater[J]. Geophysical Research Letters, 1994, 21(19): 2115-2118.
- [28] 徐行, 施小斌, 罗贤虎, 等. 南海西沙海槽地区的海底热流测量[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(8): 51-59.
- [29] 廖静. 琼东南盆地崖南凹陷有利勘探区研究 [J]. 内江科技, 2013, (5): 43-44.
- [30] 朱光辉, 陈刚, 刁应护. 琼东南盆地温压场特征及其与油气运聚的关系[J]. 中国海上油气(地质), 2000, 14(1): 29-36.

编辑:董庸

Distribution Features and Accumulation Model of Natural Gas Hydrate in the South of Xisha Islands Seas, South China Sea

Yang Taotao, Lü Fuliang, Wang Bin, Yang Zhili,
Lu Yintao, Sun Guozhong

Abstract: According to the new 3D seismic data, three seismic identifications of natural gas hydrate are discovered in south of Xisha Islands seas, South China Sea: (1) Obvious bottom simulating reflector (BSR) shows strong amplitude and continuous reflection, opposite polarity in contrast to the seafloor reflection, and nearly parallel to sea floor and translayer phenomena. (2) There are blanking zones(BZ) accompanied with BSR. (3) Amplitude enhances versus increasing offset. Natural gas hydrate distributes in dispersive blocks in plane and gas hydrate enriches in center but gets reducing toward periphery within a single block. It is estimated that the stable zone of gas hydrate is about 120m thick. The result of geology analogy shows that gas hydrate accumulation is commonly effected by some conditions including gas source, temperature-pressure and structure-sedimentation. A geological model of gas hydrate accumulation is established.

Key words: Natural gas hydrate; Seismic feature; Controlling factor; Accumulation model; Xisha Islands seas

Yang Taotao: male, MSc., Geological Engineer. Add: PetroChina Hangzhou Institute of Geology, 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang, 310023, China