

南海东沙海域天然气水合物与地质构造的关系

龚跃华¹, 吴时国², 张光学¹, 王宏斌¹, 梁金强¹, 郭依群¹, 沙志彬¹

(1 广州海洋地质调查局, 广州 510760; 2 中国科学院 海洋研究所, 青岛 266071)

摘要: 构造作用和构造过程是控制天然气水合物发育和赋存的重要地质因素之一。陆坡区复杂的构造运动能够形成良好的气体运移通道以及欠压实、高孔隙的水合物储集空间。东沙群岛邻近海域具有水深变化大、沉积厚度大、沉积速率高和有机质丰富等天然气水合物有利赋存条件, 最新的研究已经在该海域发现了天然气水合物赋存的地球物理证据 BSR, 针对东沙群岛海域广泛发育的断裂、底辟、海底滑坡等构造, 开展了其与天然气水合物成藏的关系研究, 可以进一步深入了解天然气水合物在东沙群岛不同地质构造中的分布特征与演化, 为该区天然气远景评估提供参考。

关键词: 断裂; 底辟; 海底扇; 海底滑坡; 天然气水合物; 东沙群岛

中图分类号: P744.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0256-1492(2008)01-0099-06

天然气水合物的主要成分是甲烷和水, 在天然气水合物稳定域内, 对天然气水合物成藏最为关键因素是烃类气体丰度及其向上运移通道, 而切穿沉积盖层的断裂与上升烃类流体密切相关, 高渗透带的底辟和泥火山等侵入构造也是活跃的流体逸出环境, 所以, 海底断裂、底辟及泥火山等构造周围就可能存在天然气水合物的分布。另外, 由于陆坡区的水深相对较浅, 其水合物沉积层易受外界温压变化的影响发生失稳分解, 诱发海底滑坡, 所以, 滑坡与水合物赋存之间的关系非常密切。断裂、泥火山、海底滑坡等构造与天然气水合物间的关系研究, 可以建立各种构造与水合物在成因、聚集、运移等方面的关系, 了解断层、底辟、泥火山、海底滑塌体等对水合物形成和分布的影响, 以及它们各自对天然气水合物的成藏、富集等的不同作用, 可为更精确地评估其资源潜力提供参考。

1 断层与天然气水合物依存关系

就天然气水合物成藏条件而言, 在满足其温压域条件下, 其成分的重要物质组成部分——甲烷的来源就成了制约其成矿的关键因素, 到目前为止, 专家认为形成水合物的甲烷气体可分为无机成因气和

有机成因气两大类^[1], 无机成因气对水合物成藏影响的研究及报道较少, 而有机成因气又可分成生物成因气和热解成因气, 虽然目前主要发现的天然气水合物都是以生物成因的气体为主, 但对于资源量约等于煤、石油、天然气储量的两倍的天然气水合物而言, 单靠浅层沉积物中的有机质细菌降解作用下产生的生物成因气是难以产生如此巨大的资源前景的, 热解成因气对天然气水合物成藏有着不可低估的贡献^[2]。热解成因气相对水合物储集层, 位于沉积层深部, 这时, 切穿沉积盖层的断裂形成的上升烃类流体就与天然气水合物密切相关, 正是这些断层为深部气源向浅部运移提供了通道, 深部的油气沿断层垂向运移和沿不整合面侧向运移是浅层气聚集不可缺少的条件。同时, 断层的发育在水合物聚集成藏的形成过程中, 不仅提供了运移的通道, 而且影响了天然气从液态中的分离和聚集。当其切过深部油藏时, 地层压力骤然下降, 天然气会不断地从石油中析出, 沿着断层向上运移, 形成纯气藏或水合物矿藏。在运移过程中相态的分异比在圈闭内部更加完全, 其中甲烷气运移速度最快, 运移距离最远, 甚至可以连续气流的方式运移, 而浅部的褶皱构造可适时圈闭住运移到浅部的气体, 因此, 更容易在盆地的边缘或内部的凸起带、断裂带形成纯气藏或在海底浅表层形成水合物矿藏^[3]。这种水合物矿藏一般称为构造型水合物及其 BSR, BSR 显示出轻微上隆并被断层错断所复杂化, 部分气体可通过断层再向上迁移进入水体形成“羽状流”, 在海底形成“梅花坑”地貌, 发育各种化能自养生物群落^[4]。

基金项目: 国家专项 (GZH200200203-02-03)

作者简介: 龚跃华 (1969—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事天然气水合物地球物理勘探及其地质构造特征研究, E-mail: yhgong_1109@163.com

收稿日期: 2007-09-15; 改回日期: 2007-10-28. 周立君编辑

南海北部东沙海域位于南海东北部、台湾的西南部,区内主要发育台西南盆地,前人研究认为台西南盆地是一个在南海北部陆缘上发展起来的新生代伸展型断陷盆地,其东侧是菲律宾海板块和欧亚板块碰撞挤压的结合部,有逆冲构造十分发育的台湾造山带;北部是宽广而略微倾斜的陆架,和台湾浅滩、澎湖隆起、北港隆起相邻,南面延伸入南海海盆,西靠东沙隆起,盆地处于欧亚板块、太平洋板块和菲律宾海板块结合带上,总体呈NE—NEE走向,在地貌上从陆坡到海盆的变化非常明显^[5](图1)。总体而言,台西南盆地的构造发育既经历了早期的拉张,也经历了后期挤压。拉张发生于古近纪早期,即盆地的初始断陷阶段,形成了盆地的分割半地堑原型,接受了400~2000 m厚的海陆交互相沉积,随着断陷作用的进一步加强,整个台西南盆地快速沉降,接受了滨海—浅海相的沉积。此阶段主要为水合物积累了原始的物质基础——烃源岩。渐新世末期发生了重要的构造反转,台西南盆地经历了一次强烈的挤压事件,使得盆地发生挤压变形,早期的正断层局部发生反转,而且还发育了大量的逆冲断层及其相关的褶皱。此时期形成的大量断层、

褶皱为水合物的形成提供了必不可少的流体运移通道。晚中新世以来进入以稳定的热力学沉降为主的阶段,从而形成了上中新统—第四系的区域披覆层。接受了约1600~4400 m的半深海—深海相沉积。但由于受早期继承性断层的影响,断裂构造仍相当发育(图2,位于研究区西北部),以研究区为例,断裂系统可分为两组,即NE—NNE向和NW向(图3),都属于正断层,NE—NNE向断裂无论从发育规模、数量上都比北西向断裂占优势,控制了工区的主要构造走向,倾向有NW、SE两组,以SE、SEE倾向为主,SE、NW倾向断裂系及NW走向断裂系构成了工区自西向东显著隆、坳相间的地貌特征;北西向断裂也都属于正断层,有切割北东向断层的趋势,北西向断层相对主排列的北东向成为一组反向断层系,这对适时圈闭向上运移的流体是非常有利的。而北东向断裂相对北西向断裂属于深大断裂,部分断裂可向下延至基底,向上断层切穿晚中新世—上新世的大部分地层,有的甚至达到海底,说明断裂开始形成时期较早,活动时间长,为台西南盆地深坳陷内产生的流体向上运移至水合物稳定域提供了重要的通道。因此,东沙群岛海域北东向断裂系统主要

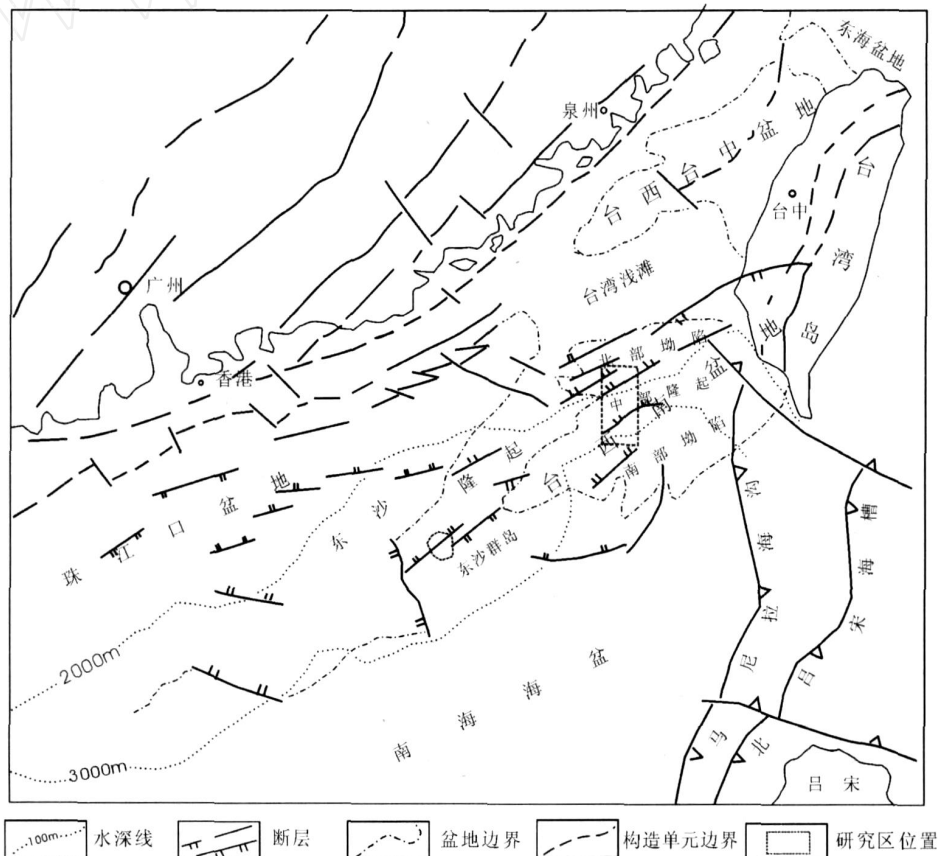


图1 研究区构造位置示意图

Fig. 1 The geologic frame and structures of Dongsha Islands sea area

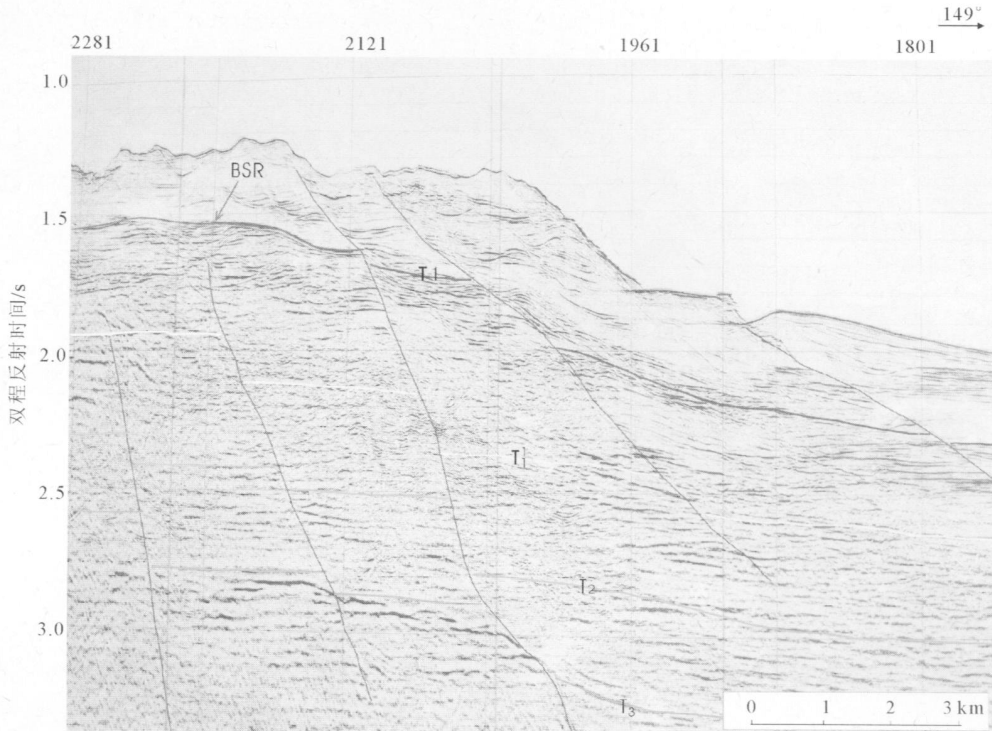


图 2 东沙群岛海域北东走向断层地震剖面

Fig. 2 Seismic profile of NE-trending fault in the Dongsha Islands

起沟通深部流体向上运移的通道作用,而北西向断裂系统有助于封堵住运移到浅层的流体,在合适的温压域形成水合物。

2 滑塌与天然气水合物赋存

滑塌构造是指在重力作用下,海底沉积物沿滑移面发生滑塌,于低地形处堆积而成的一种杂乱构造。常发育于坡折带或陡峭的陆坡上。滑塌构造与水合物关系密切,一方面滑塌作用有利于水合物生成,在海底由于地震、火山喷发、风暴波和沉积物快速堆积等事件或因坡体过度倾斜引发滑塌,松散的、富含有机质的滑塌体沉积物由于受到侧向压实作用导致流体大量排放,气体向浅部扩散、渗滤进而形成水合物。另一方面,滑塌构造也可能是水合物分解后的产物。海底天然气水合物稳定带是在特定的温压条件下形成的($T < 0 \sim 10$, $P > 10$ MPa)。由于海平面下降、地震、火山等容易导致海底温压条件改变的事件发生,大陆斜坡上的天然气水合物稳定带将发生变化,一部分水合物将分解释放出气体,使天然气水合物带从半胶结状态转变为充满气体的状态,从而使沉积物胶结强度减弱。除非孔隙水能随意流动,否则这种气体的释放同时将导致孔隙压力的过剩,从而降低斜坡的稳定性,最终导致海底滑坡^[6]。滑塌产生的BSR多位于滑塌体内或与滑移面重合,规模较大,呈不连续或突变状,水合物主要聚集在BSR之上的相对狭窄地带。

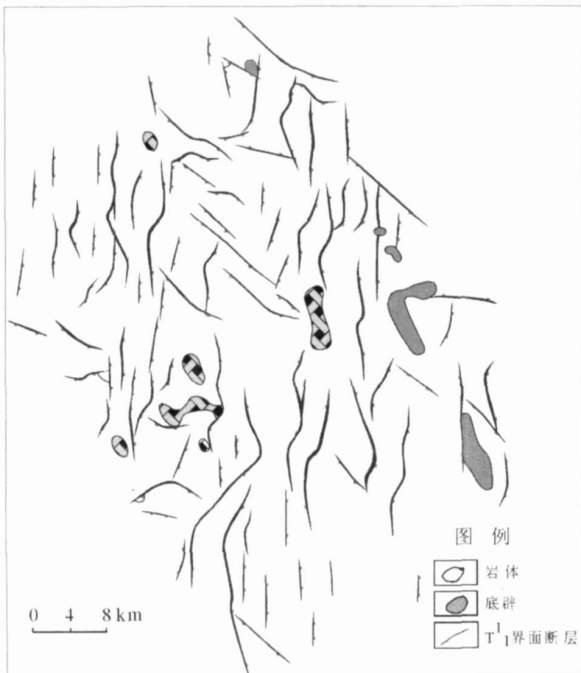


图 3 东沙群岛海域水合物成矿地质要素

Fig. 3 The geologic frame of gas hydrate deposition in the Dongsha Islands sea area

东沙群岛海域不同时期的沉积相分布图最新研究表明,晚中新世以来研究区都是以滑塌沉积为主。形成如此巨大规模的滑塌体,因素主要有3个:物源供给充分、海平面频繁变化和强的水动力条件,其中,海平面下降是造成沉积物不稳定的主要因素,研究区位于南海与外海的通道口(台湾海峡)附近,海流的强烈冲刷是形成滑塌的诱发因素。

经过分析对比,认为东沙群岛海域滑塌沉积体系可细分为三部分:斜坡上部的滑塌扇体,中下部的滑塌块体和坡脚的滑塌前缘。据水合物赋存层层序沉积相平面图(图4),对比地震剖面可知,研究区东部和西部的滑塌强烈,呈明显的丘状或波状起伏,厚度变化大。中部由于受下切水道的侵蚀,厚度薄,起伏不大。西部滑塌体的三个组成部分发育齐全,而东部则不发育滑塌块体部分。东部比西部更加靠近台湾海峡的出口处,海流更强。推测坡度陡和强的水动力条件造成了东部陆架边缘不稳定沉积物的“崩塌”,破坏程度大,因而以发育滑塌扇沉积为主,而西部相对较弱的水流强度和较缓的坡度只能造成不稳定沉积物的“滑塌”,破坏程度相对小,以发育滑塌块体为主。

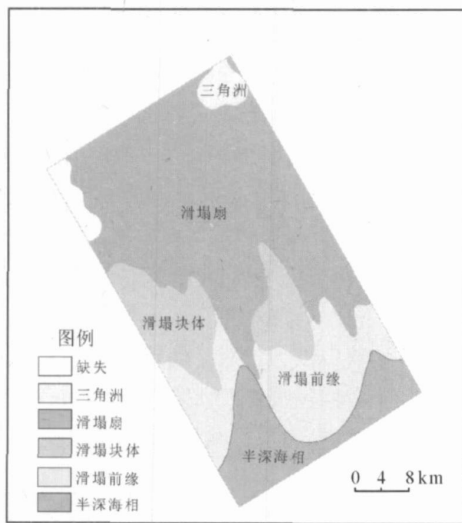


图4 东沙群岛海域水合物赋存层沉积相平面图

Fig. 4 Sedimentary facies of gas hydrate deposits in the Dongsha Islands sea area

调查发现,研究区内多数测线段上的滑塌沉积体内发现了BSR,BSR主要分布在滑塌扇的下端和滑塌块体中,究其原因,滑塌体直接暴露于海底,没有盖层遮挡,虽然滑塌扇的中上部孔隙度大,但气体更加容易逸散,而孔隙度较低的扇端和滑塌块体,气体逸散的速度相对要慢,并且扇端和滑塌块体处于斜坡下部,水深较大,其上部几百米甚至深达千米的

水体产生的压力对逸散的气体可起到封压作用。另一方面,滑塌扇的扇端和滑塌块体有机质丰度较高,并能有效地保存,为天然气水合物的形成提供了充足气源。因此,滑塌沉积体特别是滑塌扇的下端和滑塌块体,是东沙群岛海域天然气水合物富集的有利目标区。

3 底辟构造(泥火山)与天然气水合物赋存

底辟构造是在地质应力的驱使下,深部或层间的塑性物质(泥、盐)垂向流动,致使沉积层上拱或刺穿,侧向地层遭受牵引,在地震剖面上呈现出轮廓明显的反射中断^[7]。据世界天然气水合物发现区的地质构造特征研究发现,底辟构造和天然气水合物的形成与聚集有密不可分的关系。海底泥火山和泥底辟是海底流体逸出的表现,当含有过饱和气体的流体从深部向上运移到海底浅部时,由于受到快速的过冷却作用而在泥火山周围形成了天然气水合物。如墨西哥湾、鄂霍茨克海、里海、黑海等已在沉积物中获得水合物,对这些地区天然气水合物的赋存情况分析表明,泥底辟或泥火山顶部附近普遍存在水合物^[8-9]。

底辟构造作为天然气水合物赋存的有效构造单元引起了水合物勘探研究的高度关注。东沙群岛海域的南部和东部均处于莫霍面较浅的位置,特别是东南部地区,莫霍面深度都在14 km以内(据龚再升、李思田等,1997年),地幔热流活跃为底辟活动发育提供了内部动力机制。此外,这里经历的复杂地质构造运动(拉伸断陷、构造反转等),也为底辟发育提供构造应力条件。在东沙隆起附近、东沙东坳陷特别是东沙东坳陷的北部,在高分辨率地震剖面上都显示有大量底辟构造发育,其地震反射表现为反射同相轴的错断、扰动、杂乱反射地震特征(图5,位于研究区西南端);多发育于构造低部位或隆坳转折带,且发育于这些部位的底辟规模也相对较大,与断裂相伴生,底辟内可解释出形态不一的断层系,其产状陡,断距小,以正断层为主,在垂向上断层可以是连续的,也可以是在不同层系中由不同的断层系组成的垂向断裂破碎带,甚至在不同层系中的断层倾向完全相反;形态各异,呈现出柱样、蘑菇状和枕状等不同形态,泥底辟的发育演化与油气的生、运、散息息相关,而底辟本身及其围岩就是一个高温高压地质封闭体,其烃类及流体的运聚与塑性泥岩的流动,均与该封闭体的顶封闭层的形成与破坏存在

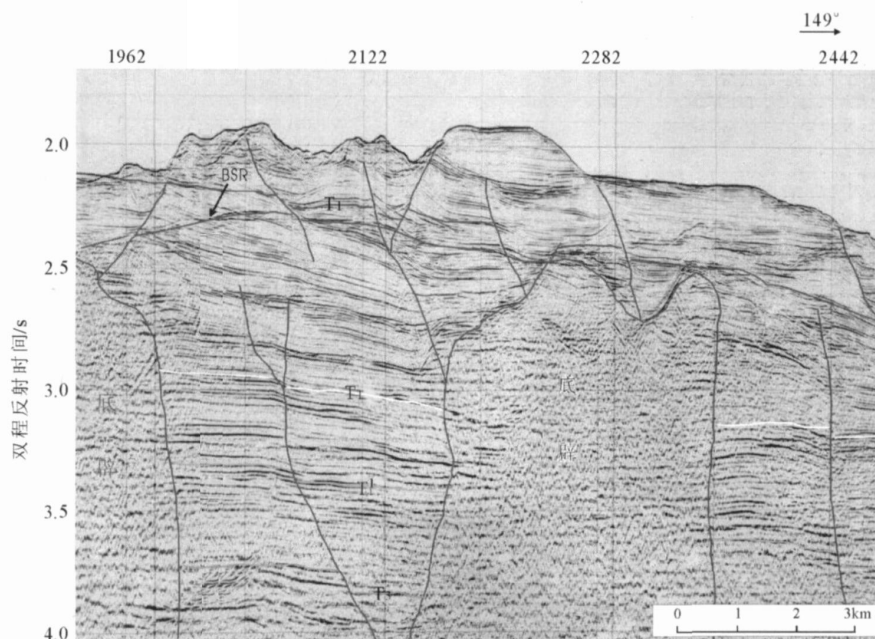


图 5 东沙群岛海域底辟构造地震反射特征

Fig. 5 Seismic reflection profile of diapirs in the Dongsha Islands sea area

直接的关系。按底辟能量大小,泥底辟可分刺穿型和未刺穿型两种,刺穿型底辟由于其能量巨大,能量达到或超过上覆地层的破裂强度,烃类及流体从底辟释放出去,对气体成藏和水合物形成都极为不利。但未刺穿型底辟其能量尚未达到使上覆地层破裂的程度,底辟上拱的能量与上覆地层达到能量平衡,油气和其他流体随烃源岩上拱沿垂向裂缝和裂隙向上运移,进入底辟顶部上覆地层,当运移至天然气水合物稳定带内,即形成天然气水合物。

4 讨论

通过上面分析可知,东沙群岛海域天然气水合物控矿构造类型主要有断褶型、滑塌型和底辟型 3 种,但它们对水合物成藏也不是孤立起作用的,如断裂的拆离作用对滑塌的发生有积极的推动作用,底辟构造对流体向上疏导实际是底辟内无数小断层对流体的导流作用,但从 3 种构造类型形成机理来看,由于其发育规模、时期、分布位置的不同,对区内水合物成藏作用各有不同侧重,断裂作用由于其主要起沟通深部产油气源区,因此,在工区对构造高部位的水合物形成最为有利;滑塌作用由于受其形成条件控制,主要对构造转换带水合物成藏有利;底辟作用的形成需一定的物质基础——泥或盐,因此,底辟作用主要控制构造低部位或隆坳转折带水合物的成藏。从它们对水合物成藏的富集程度、分布范围、

影响大小因子来看,应推底辟型水合物最占优势,其次是断层型水合物,滑塌型水合物也是一种值得注意的控矿模式之一。

5 结论

(1) 东沙群岛海域具有水深、沉积厚度大、有机质丰富等特点,有利于天然气水合物的形成与赋存,最有利的控矿构造类型可分为断褶型、滑塌型和底辟型 3 种,最新的研究在该海域发现了大量 BSR 分布^[10-11],圈定了该海域天然气水合物的可能分布区。

(2) 对比分析天然气水合物可能分布区与有利地质构造分布可知:在东沙群岛海域的断裂发育区,特别是北西向断裂切割北东向断裂,而北东向断裂又表现深大型断裂的地区是断褶型控矿构造的主要表现形式;滑塌型控矿构造的天然气水合物主要赋存在滑塌块体和滑塌前缘;底辟构造也是一种值得重点注意的控矿构造类型。

参考文献 (References)

- [1] 师生宝. 天然气水合物的形成与识别[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(10): 14-19. [SHI Sheng-bao. Formation and recognition of natural gas hydrate[J]. Marine Geology Letters, 2006, 22(10): 14-19.]
- [2] 樊栓狮, 刘锋, 陈多福. 海洋天然气水合物的形成机理探讨[J]. 天然地球科学, 2004, 15(5): 524-530. [FAN Shuan-shi,

- LIU Feng, CHEN Duo-fu. The research of the origin mechanism of marine gas hydrate[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(5):524-530.]
- [3] 陈建渝, 曹树春, 曹忠祥, 等. 中国东部中、浅层气藏成藏动力学特征——以济阳坳陷中、浅层气藏为例[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(1):13-17. [CHEN Jian-yu, CAO Shu-chun, CAO Zhong-xiang, et al. Dynamics features of gas reservoir forming with shallow-middle depth in the east of China-taking gas reservoirs with shallow-middle depth of Jiyang depression as an example[J]. Petroleum Geology and Recover Efficiency, 2001, 8(1):13-17.]
- [4] 张光学, 祝有海, 梁金强, 等. 构造控制型天然气水合物矿藏及其特征[J]. 现代地质, 2006, 20(4):605-612. [ZHANG Guang-xue, ZHU You-hai, LIANG Jin-qiang, et al. Tectonic controls on gas hydrate deposits and their characteristics[J]. Geoscience, 2006, 20(4):605-612.]
- [5] 杜德莉. 台西南盆地的构造演化与油气藏组合分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14(3):5-18. [DU De-li. Tectonic evolution and analysis of oil-gas accumulation in Southwest Taiwan Basin [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1994, 14(3):5-18.]
- [6] 彭晓彤, 周怀阳, 陈光谦, 等. 天然气水合物与海底地质灾害、气象灾害和生物灾害的关系[J]. 自然灾害学报, 2002, 11:18-21. [PENG Xiao-tong, ZHOU Huai-yang, CHEN Guang-qian, et al. Environmental disaster of hydrate: its relationship with submarine geologic hazard, climate hazard and biologic hazard [J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11:18-21.]
- [7] 王宏斌, 张光学, 杨木壮, 等. 南海陆坡天然水合物成藏的构造环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(1):81-86. [WANG Hong-bin, ZHANG Guang-xue, YANG Mu-zhuang, et al. Structural circumstance of gas hydrate deposition in the continent, the South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2003, 23(1):81-86.]
- [8] Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates [J]. Marine Geology, 2000, 167(1-2):29-42.
- [9] 张光学, 黄永祥. 活动大陆边缘水合物分布规律及成藏过程[J]. 海洋地质动态, 2001, 17(7):3-7. [ZHANG Guang-xue, HUANG Yong-yang. Gas hydrate in the active continental margin and its pool formation process[J]. Marine Geology Letters, 2001, 17(7):3-7.]
- [10] 张志杰, 于兴河, 刘博. 我国台西南附近构造沉降与沉积作用对气水合物成藏的可能控制[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(6):655-659. [ZHANG Zhi-jie, YU Xing-he, LIU Bo. Tectonic and sedimentary controls on the likelihood of gas hydrate occurrence near west and south of Taiwan in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(6):655-659.]
- [11] 尚继宏, 李家彪. 南海东北部陆坡与恒春海脊天然气水合物分布的地震反射特征对比[J]. 海洋学研究, 2006, 24(4):12-19. [SHANG Ji-hong, LI Jia-biao. A study on the seismic reflection of the gas hydrate distribution at the northeast SCS slope and Hengchun ridge [J]. Research of Oceanography, 2006, 24(4):12-19.]

RELATION BETWEEN GAS HYDRATE AND GEOLOGIC STRUCTURES IN DONGSHA ISLANDS SEA AREA OF SOUTH CHINE SEA

GONG Yue-hua¹, WU Shi-guo², ZHANG Guang-xue¹, WANG Hong-bin¹
LIANG Jin-qiang¹, GUO Yi-qun¹, SHA Zhi-bin¹

(1 Guangzhou Marine Geologic Survey, Guangzhou 510760, China;

2 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Tectonic process and structural functions are important geological factors which control the formation and existence of gas hydrates. Favorable channels for gas flowing and incompact reservoir with high porosity for gas hydrates can result from complicated structural movements in continental slopes. Dongsha Islands and adjacent area have favorable conditions for gas hydrate formation as they have large water depth, large sediment thickness, high sedimentation rate, and high organic matter. The recent study also lets us find geophysical identification sign BSR of gas hydrate. Using the present study results, we have done the relationship study between the gas hydrate occurrence and the fault fracture, mud volcano, and submarine landslide. This study will help find out the distribution characteristics and the evolution of gas hydrate in various structural fields, and make a contribution to the resource assessment of gas hydrate.

Key words: gas hydrate; fault fracture; mud volcano; submarine fan; submarine landslide; Dongsha Islands and adjacent area