

冲绳海槽西侧陆坡及其邻区天然气水合物 成藏构造特征*

郭军华¹ 吴时国^{1,2} 徐宁³ 范奉鑫¹

(1. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2. 中国石油大学(华东) 青岛 266555;
3. 中国石油天然气勘探开发公司 北京 100034)

提要 为了解特殊地质体与天然气水合物成藏构造特征之间的关系,作者以冲绳海槽西侧陆坡和槽底为例,利用地震资料和地球化学方法对该地区上新世和第四纪沉积物厚度、有机碳含量和断裂系统进行了分析。研究表明,在冲绳海槽西侧及槽底都发育了较厚的上新统和第四系沉积层,上新统厚度约为1000—1500 m,第四系厚约为1000—3500 m,其中海槽南段存在巨厚的第四系,而且冲绳海槽西侧陆坡沉积物中有机质含量高达0.75%—1.25%,并且沉积速率高达10—40 cm/ka,有利于有机质的保存和转化。陆坡发育有与海槽走向一致的NE-SW向断裂系统,以及横切海槽的一系列NW-SE向水平错动扭性断裂系统,其中NE-SW向断层在海槽南段方向变为NEE-SWW,这些断裂系统为烃类气(流)体的运移创造了有利条件。因此,在冲绳海槽西侧陆坡发育的海底峡谷、滑塌体、断块隆脊、泥底辟等特殊地质体与天然气水合物的形成密切相关。

关键词 冲绳海槽, 陆坡, 构造特征, 天然气水合物

中图分类号 P731

东海大陆边缘以其丰富的资源和重要科学意义一直为国内外学者所关注,尤其是随着天然气水合物研究的兴起,该区域逐渐成为研究的热点区域。冲绳海槽是发育在东海大陆边缘的一个新生的弧后盆地。新生代期间,在菲律宾板块的俯冲碰撞作用下,欧亚大陆边缘发生挤压、张裂等构造活动,冲绳海槽正是在这种构造背景下形成的。目前研究表明,冲绳海槽具有良好的天然气水合物资源前景(方银霞等,2003;龚建明等,2001;唐勇等,2003)。海槽西侧陆坡不仅满足天然气水合物形成的温压场条件,而且还为天然气水合物的形成提供了有利的构造条件。

海底构造往往控制着天然气水合物的形成和分布。据目前研究表明,海底峡谷、泥底辟构

造、滑塌体、断块隆脊等构造地质体控制了水合物的成矿规律(Bouriak *et al*, 2000; Milkov *et al*, 2000; Lüdmann *et al*, 2003; Pierre *et al*, 2002; 刘保华等,2005; 刘建华等,2005; 丁巍伟等,2006)。本文中讨论这些控制天然气水合物成藏的地质体的构造特征。

1 海槽西侧陆坡沉积层序、断裂系统

冲绳海槽经历了中新世末和上新世末两次构造运动后,其北部在上新世末受到来自菲律宾奄美海台残留板块的碰撞、挤压,拉张作用受到抑制,仅充填有断陷盆地沉积层序。在海槽南段,上新世末受到菲律宾海加瓜海岭的碰撞和持续俯冲,从而发生弧后扩张,发育有海底磁条带(王家林等,1997)。

*中国科学院创新工程项目, KZCX3-SW-224 和 219 号; 国家高技术研究发展计划(863 项目), 2006AA09A209-6 号。
郭军华, E-mail: jg2kc@mizzou.edu

通讯作者: 吴时国, 研究员, E-mail: swu@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2006-01-04, 收修改稿日期: 2006-12-06

表 1 冲绳海槽晚新生代地层层序
Tab.1 Late Cenozoic sedimentary sequences in the Okinawa Trough

层序	年代地层	内部反射结构	频率	反射连续性	厚度(m)
III	第四纪 2 Ma	平行	高	好	1000—3500
II	上新世 9—6 Ma	平行-亚平行	中等	好-中等	1000—1500
I	中新世	丘状	中等-低	中等-差	500—1000
基底	前中新世	丘状-双曲线	低	差	

海槽西侧陆坡和海槽内发育了较厚的上新统和第四系沉积层(表 1)。第四系沉积可能为固结的绿灰色凝灰质粘土、淡褐色和绿灰色多孔砂岩、中粒凝灰质砂等,含潜穴化石,为滨海-浅海相。上新统沉积可能为白云质泥岩和砂岩、中粒砂岩以及火成碎屑岩和熔岩,为浅海-半深海相。中新统沉积可能为砂岩、泥岩互层和熔凝灰岩等火成岩类组成,为海陆过渡相。南段海槽可能只存在巨厚的第四纪地层(Letouzey *et al.*, 1986)。这些沉积物中有机质含量高,有机碳含量为 0.75%—1.25%,沉积速率大,达到 10—40 cm/ka(李培英等, 1999)。这一切为水合物的形成提供了充足的气源条件。

系统,一组是顺海槽走向展布的 NNE 向平行断裂系统,在海槽南部变为近 E-W 向,海槽的两个边坡和中央地堑均很发育,按其切割深度,又可分为两类,一类切割深度大,此类断裂多发育在海槽两坡,另一类切割深度小,仅发生在第四纪地层内,规模较小,多发育在槽底中央部位,这一组平行于海槽走向的纵断层具有张裂性质,许多的断层面上陡下缓,断层两盘厚度不同,下盘厚度明显增大,表明此类断层是伴随着海槽的拉伸逐渐发展而成的(李乃胜, 1988);另一组是横切海槽走向的 NW 向断裂系统,是一些水平错动型扭性断裂,绝大部分具有左旋性质,在宫古断裂带以南出现一些右旋断裂,这一组断层将海槽划分为不同的块体,最明显的是吐噶喇断裂和宫古断裂,它们将海槽划分为北、中、南三段(刘保华等, 2005)。该区域发育的大量断层为天然气的运移提供了良好的通道。

2 西侧陆坡区地貌、构造特征

冲绳海槽长期以来一直是大陆风化剥蚀产物经搬运入海后的一个主要汇聚盆地,海槽的沉积物分布显示海槽西侧陆坡主要是陆源和生物源成分,有机质丰富的沉积物快速堆积下来,大量的有机质得以保存下来,经细菌作用转变为大量的甲烷,同时较快的沉积速率容易形成沉积物欠压实区,构筑了良好的流体输导体系,十分有利于天然气水合物的形成。

冲绳海槽的西侧陆坡与东海大陆架相连,它紧贴东海大陆架外缘分布,地形由大陆架向海槽骤然变陡。由于新生代以来构造变动比较强烈,构造地貌形态发育,斜坡带的整体形态成带状分布,依构造线走向 NNE 延伸。冲绳海槽及其邻区海底地形复杂,地貌类型繁多,陆坡上发育了一系列与天然气水合物有关的构造地貌,如海底峡谷、滑塌体、断块隆脊、泥火山等类型(图 2)。

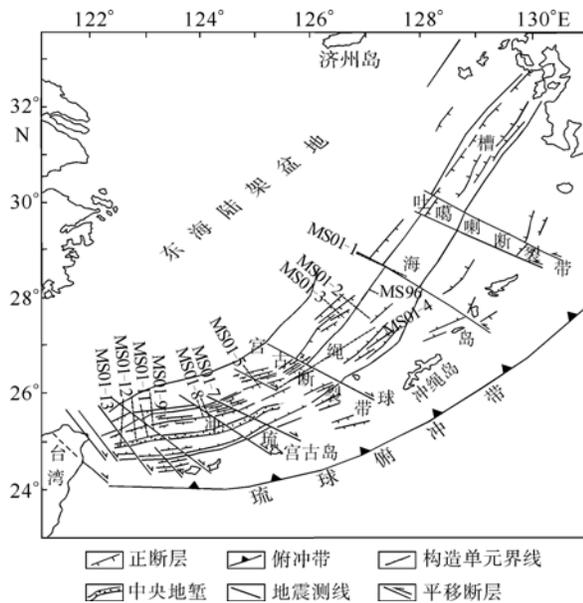


图 1 冲绳海槽主要断裂分布图(据金翔龙等, 1987; Kong *et al.*, 2000)

Fig.1 Faults distribution in the Okinawa Trough (after Jin *et al.*, 1987; Kong *et al.*, 2000)

海槽的一个明显构造特征是断裂系统极为发育(金翔龙等, 1987)(图 1)。主要存在两组断裂

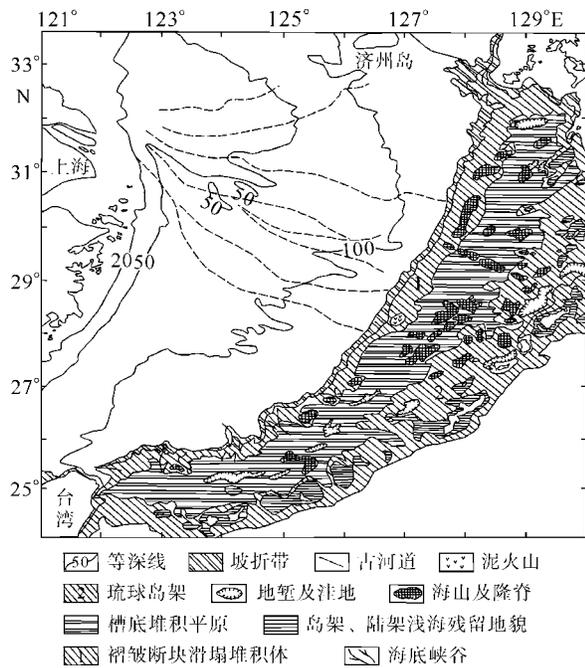


图2 冲绳海槽地貌图(据喻普之等, 1992)

Fig.2 Geomorphology of the Okinawa Trough (after Yu *et al.*, 1992)

从北往南, 奄美大岛以北的吐噶喇断裂带和冲绳岛与宫古岛之间的宫古断裂带, 将海槽分为北、中、南三段, 三段的划分与海槽各部分受到的不同构造作用有关, 同样海槽西侧陆坡也被划分为不同的三段, 在控制天然气水合物成矿的构造特征上各段也是不同的。西侧陆坡北段走向 NNE, 水深较浅, 坡度较平缓, 坡宽 56km。冲绳海槽北部区域地震活动活跃, 断层、断块、滑塌体构造发育, 在海槽西侧的陆坡下部还存在有大范围的海底隆起区; 中段走向 NE, 起伏较大, 坡宽 29km, 在陆坡坡折带陆坡一侧发育着与泥底辟有关的泥火山构造, 在坡折带区域还有一系列的断块隆脊, 同时断层、海底峡谷也很发育; 南段走向 NEE-SWW, 槽坡较陡, 坡宽 51km, 该区海底峡谷、断层、断块、海底隆起发育, 滑塌体规模很大(刘保华等, 2005)。

3 西侧陆坡构造地质体

3.1 海底峡谷

研究表明, 水合物可在海底峡谷处存在, 密西西比海底峡谷 250—1250 m 水深处发现具有强振幅反射波和强衰减孤立区域, 指示了水合物的存在(Milkov *et al.*, 2000)。冲绳海槽西侧的陆坡和陆架坡折带, 发育了众多的海底峡谷(图3),

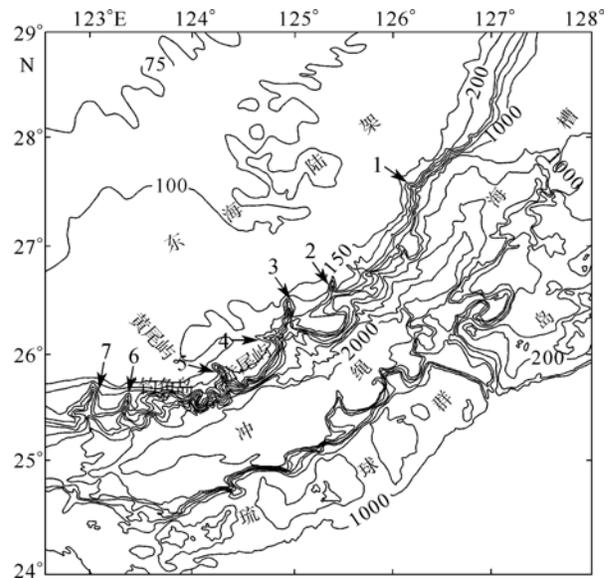


图3 冲绳海槽中南段地形及海底峡谷(据李巍然等, 2001)

Fig.3 The bathymetry of the middle and the southern Okinawa Trough and the submarine canyons (after Li *et al.*, 2001)

1. 伊西海底峡谷群; 2. 第1北东赤尾海底峡谷; 3. 第1赤尾海底峡谷; 4. 第2赤尾海底峡谷; 5. 东黄尾海底峡谷;
6. 南西钓鱼海底峡谷; 7. 西钓鱼海底峡谷

这些峡谷主要分布在 $28^{\circ}10'N$ 以南, 其规模大小不同, 但有从东北向西南由小变大的趋势, 不少峡谷从陆架外缘开始, 直穿切至槽底(高金满等, 1987; 李巍然等, 2001; 刘忠臣等, 2003)。

峡谷口外普遍出现高沉积速率, 陆源碎屑经海底峡谷集中搬运到峡谷口外形成海底浊积扇(李巍然等, 2001)。峡谷上段沉积物不发育, 这可能是由于粗重的沉积物位于坡折地带, 本身比较容易松动, 或者由于海平面变化导致温度压力的变化从而水合物分解气体外溢, 产生重力滑塌、浊流、碎屑流, 发生侵蚀作用。同时这些海底峡谷的发育与 NW-SE 向横切海槽的断层是密切相关的, 沿断层发育地带在低海平面时期容易为河流所侵蚀, 形成海底峡谷, 在全新世高水位域期间, 作为海底浊流的通道, 峡谷口外高的沉积速率, 有利于有机质的快速埋藏。

3.2 滑塌体

研究揭示水合物与滑塌体关系密切, 在 Storegga 滑塌体(Bouriak *et al.*, 2000)以及日本南海海槽东部增生楔滑塌体(Pierre *et al.*,

2002)都发现有水合物存在。冲绳海槽滑塌体受地形控制,呈带状分布,与东海陆架向陆坡的转折线平行(图 2)。滑塌体的存在一般需要两个条件,一是存在大量的沉积物来源,另一方面是明显的滑动面存在。此外水合物的分解和释放对滑塌构造的形成具有非常密切的关系。在地震剖面上,滑塌体表现为一些背式重叠结构。向海槽方向有一大的滑塌块体,从地震剖面结构看,可能是陆坡沉积物由于塌落滑移到海槽中而形成的。地震剖面结构还显示沉积物有向槽底运移的趋势(图 4)。

天然气水合物的赋存需要合适的温度、压力环境,滑塌作用可以导致局部区域的沉积物的快速堆积,从而产生局部的压力屏蔽作用,此时如果屏蔽内部存在较为充足的水合物气体时,天然气水合物较容易形成(王宏斌等, 2003)。此外,滑塌体与天然气水合物稳定带底界 BSR 是有关的。BSR 被认为是一个很特殊的剪切应力界面,当温度、压力变化造成稳定带中气体逃逸,其上覆的沉积物剪切应力减弱,形成一脆弱带,在陆坡、岛坡倾斜角度与超孔隙流体压力的共同作用下,可以导致陆坡、岛坡沉积物的塌落、滑动产生滑塌堆积体(Pierre *et al.*, 2002)。

结合海槽构造活动性,作者认为西侧陆坡活动张性断层和天然气水合物稳定带的影响是该区域滑塌体发育的两个很重要因素,在张性断层活动的影响下,加之陆坡倾斜角度过大,西侧陆坡脆弱的沉积层很容易被破坏。

3.3 断块隆脊

研究发现,鄂克霍茨海西北部泥底和断块隆

脊区域也发育有天然气水合物(Lüdmann *et al.*, 2003)。冲绳海槽地区断块隆脊由一系列 NNE 向的断块山地组成,它们顶部可能发育了晚中新世以来的沉积层(图 5)。地震剖面显示海槽西侧陆坡为一系列 NNE 向的断层所切割,沉积层在断层作用下发生了不同程度的变形,可以看出这些断层年龄是比较新的。从陆坡向海槽方向发育了规模不等的几个断块山地,其中规模最大的一个接近海槽一侧,其东西两侧都有断层存在,断层向上直切到海底。上述事实表明,断块隆脊的形成与 NNE 向断层关系密切。此外断块隆脊往下部有岩浆侵入现象,岩浆携带的热能为海底有机质的转化和烃类的生成提供了充足的热源保证,控制断块隆脊的断层,同时也为沉积层下部流体向上部迁移提供了良好的通道。所有这一切都为天然气水合物形成提供了充分的物源基础。

3.4 泥底辟构造

在里海、黑海、地中海、挪威海、巴巴多斯滨海地区、尼日利亚滨海地区以及墨西哥湾相继发现了与海底泥火山有关的天然气水合物。泥火山的形成机制主要有两种方式,一种是由于流体沿底辟构造体本身穿刺出露海底的泥底辟,另一种是流体沿断层和破裂带上涌而形成的,形成因素主要是很高的沉积速率和活动大陆边缘侧向挤压应力作用两个方面(Milkov, 2000)。挪威海 Haakon Mosby 泥火山研究表明,天然气水合物的聚集受上升热流体的影响呈现同心带状结构(Ginsburg *et al.*, 1999)。

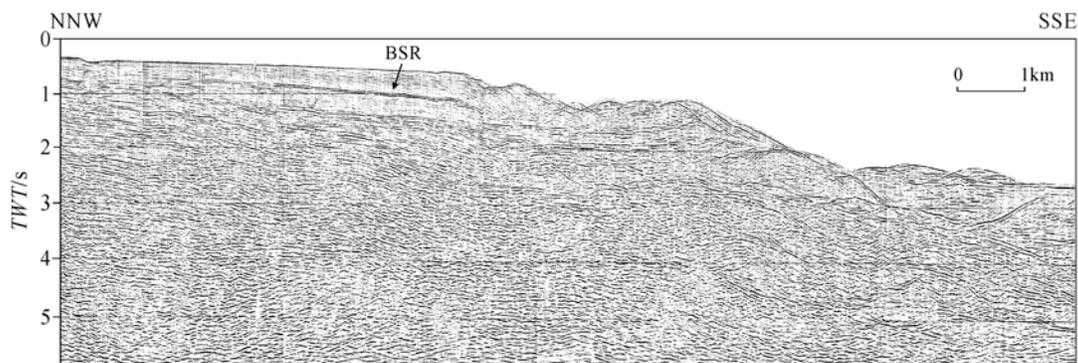


图 4 MS01-8 地震剖面显示的海槽西侧陆坡滑塌体(剖面位置见图 1)

Fig.4 Slides in the western slope of the Okinawa Trough shown in the seismic profile MS01-8, and location of the seismic line segment shown in Fig.1

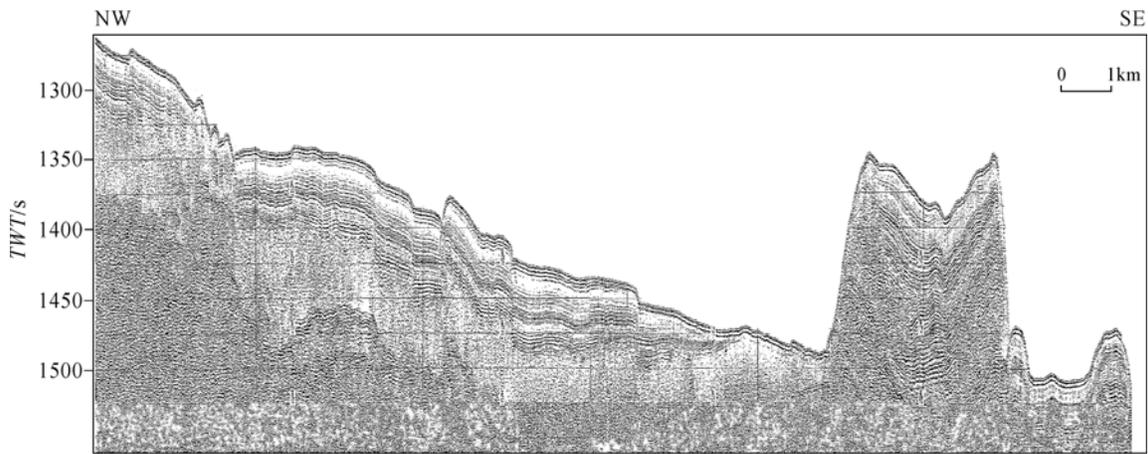


图5 MS96地震剖面上显示的陆架前缘断块隆脊构造, 剖面位置见图1

Fig.5 The faulted block ridge in the frontal part of the slope shown in the seismic profile MS96, and location of the seismic line segment shown in Fig.1

在东海陆架外缘的海槽西坡顶部发育有海底泥火山(Yin *et al.*, 2003), 泥火山都是泥底辟(Milkov, 2000), 因而冲绳海槽西侧陆坡附近发育的泥火山都可以称为泥底辟。该区水深 150—500m, 泥底辟的发育与很高的沉积速率和海槽西侧的断层有关, 在冰期期间海平面下降, 大陆架变窄, 长江携带大量的陆源物质直接输送到大陆坡地区, 在海槽西侧陆坡附近快速沉积下来, 沉降速率达 300m/Ma(Berné *et al.*, 2002), 产生异常高压, 同时张性断层极为发育, 为流体的迁移提供了良好的通道, 在异常压力以及上覆地层压力作用下大量流体向上运移, 从而形成该类构造。地震剖面上的亮点、强振幅杂乱反射说明气体在这类构造中起了很重要的作用, 关于气体形成原因可能为: 1)生物成因, 即细菌分解有机物; 2)热解成因气, 深部地层中热解成因的天然气向上迁移被现代沉积物捕获; 3)海平面变化引起温度、压力的改变从而导致水合物的分解; 4)深部的热液系统散发的甲烷、二氧化碳和氢气(Yin *et al.*, 2003)。因此, 可以看出水合物与泥底辟有着密切的关系, 泥底辟的发育首先是气体或流体作用的结果, 反过来指示了泥底辟发育的地区有充足的水合物形成所需的气源, 泥底辟构造为气体向上运移提供了通道, 泥底辟对四周的高压作用对水合物的形成也十分有利。

4 结论

冲绳海槽西侧陆坡边缘和海槽都发育了上新统和第四系沉积层, 这些沉积中有机质含量高, 沉积速率大, 这一切为水合物的形成提供了充足的气源基础。断裂系统发育是海槽的一个明

显的构造特征, 断裂系统为天然气的运移提供了很好的条件, 起到了很好的天然气通道作用。

在东海东部陆架外缘的转折处, 也就是海槽西侧陆坡的顶部发育了一系列的海底峡谷、滑塌体、断块隆脊、泥底辟等构造地质体, 这些构造地质体与天然气水合物有着密切的关系, 海底峡谷、滑塌体等地质体可能受到了天然气水合物分解气体的影响, 泥底辟、滑塌体以及断块隆脊等地质体反过来又为天然气水合物的形成以及赋存提供了良好的构造地质条件。尤其是海槽西侧陆坡的滑塌体和泥火山区域是今后开展天然气水合物研究值得重点关注的区域。

致谢 中国科学院海洋研究所喻普之老师在本文完成过程中提出了宝贵的意见, 审稿人就文章的某些问题提出了具体修改建议, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 丁巍伟, 陈汉林, 王渝民等, 2006. 台湾增生楔天然气水合物的地震特征. 海洋与湖沼, 37(1): 90—96
- 方银霞, 黎明碧, 金翔龙等, 2003. 东海冲绳海槽天然气水合物的形成条件. 科技通报, 19(1): 1—5
- 王宏斌, 张光学, 杨木壮等, 2003. 南海陆坡天然气水合物成藏的构造环境. 海洋地质与第四纪地质, 23(1): 81—86
- 王家林, 吴健生, 陈冰, 1997. 珠江口盆地和东海陆架盆地基底结构的综合地球物理研究. 上海: 同济大学出版社, 94—95
- 刘忠臣, 陈义兰, 丁继胜等, 2003. 东海海底地形分区特征和成因研究. 海洋科学进展, 21(2): 160—173
- 刘保华, 李西双, 赵月霞等, 2005. 冲绳海槽西部陆坡碎屑沉积物的搬运方式: 滑塌和重力流. 海洋与湖沼,

- 36(1): 1—9
- 刘建华, 林长松, 高金耀等, 2005. 冲绳海槽南段基底组成分析. 海洋与湖沼, 36(3): 261—267
- 李乃胜, 1988. 冲绳海槽断裂构造的研究. 海洋与湖沼, 19(4): 347—358
- 李培英, 王永吉, 刘振夏, 1999. 冲绳海槽年代地层与沉积速率. 中国科学(D 辑), 29(1): 50—56
- 李巍然, 杨作升, 王琦等, 2001. 冲绳海槽陆源碎屑峡谷通道搬运与海底扇沉积. 海洋与湖沼, 32(4): 371—380
- 金翔龙, 喻普之, 1987. 冲绳海槽的构造特征与演化. 中国科学(B 辑), 1: 197—203
- 唐勇, 金翔龙, 方银霞等, 2003. 冲绳海槽天然气水合物 BSR 的地震研究. 海洋学报, 25(4): 59—65
- 高金满, 李国胜, 孙家淞等, 1987. 冲绳海槽的地形地貌特征. 海洋地质与第四纪, 7(1): 51—60
- 龚建明, 杨文达, 卢振权等, 2001. 东海天然气水合物的区域地质特征及可能的远景区. 海洋地质动态, 7(7): 20—23
- 喻普之, 李乃胜, 1992. 东海地壳热流. 北京: 海洋出版社, 16
- Berné S, Vagner P, Guichare, F *et al*, 2002. Pleistocene forced regressions and tidal sand ridges in the East China Sea. *Marine Geology*, 188: 293—315
- Bouriaik S, Vanneste M, Saoutkine A, 2000. Inferred gas hydrates and clay diapirs near the Storegga Slide on the Southern edge of the Vøring Plateau, offshore Norway. *Marine Geology*, 163:125—148
- Ginsburg G D, Milkov A V, Slolviév V A *et al*, 1999. Gas hydrate accumulation at Haakon Mosby mud volcano. *Geo-Mar Lett*, 19: 57—67
- Letouzey J, Kimura M, 1986. The Okinawa Trough: genesis of a back-arc basin developing along a continental margin. *Tectonophysics*, 125: 209—230
- Kong F C, Lawver A L, Lee T Y, 2000. Evolution of the southern Taiwan-Sinzi Folded Zone and opening of the southern Okinawa Trough. *Journal of Asian Earth Science*, 18:325—341
- Lüdmann T, Wong H K, 2003. Characteristics of gas hydrate occurrences associated with mud diapirism and gas escape structures in the northwestern Sea of Okhotsk. *Marine Geology*, 201:269—286
- Milkov A V, 2000. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Marine Geology*, 167: 29—42
- Milkov A V, Sassen R, 2000. Thickness of the gas hydrate stability zone, Gulf of Mexico continental slope. *Marine & Petroleum Geology*, 17: 981—991
- Pierre C, Jean-Paul C, Siegfried J L *et al*, 2002. Slope instabilities and gravity processes in fluid migration and tectonically active environment in the eastern Nankai accretionary wedge (KAIKO-Tokai'96 cruise). *Marine Geology*, 187:193—202
- Yin P, Berné S, Vagner P *et al*, 2003. Mud volcanoes at the shelf margin of the East China Sea. *Marine Geology*, 194:135—149

STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF GAS HYDRATE DEPOSITION IN THE WEST SLOPE OF THE OKINAWA TROUGH AND ITS ADJACENT AREA

GUO Jun-Hua¹, WU Shi-Guo^{1,2}, XU Ning³, FAN Feng-Xin¹

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*; 2. *Petroleum University of China (Huadong), Qingdao, 266555*; 3. *China national Oil and Gas Exploration and Development Corporation (CNODC), Beijing, 100034*)

Abstract As a special case, the relationship between special geologic structures and hydrate formation the west slope of Okinawa Trough and the trough floor were studied. The thickness of sedimentary deposit of the Pliocene and Quaternary, the organic carbon content and the fault system were studied based on seismic and geochemical data. The results show that the sedimentation rate of the study area was high between 10—40 cm/ka, as the Pliocene was 1000—1500 m thick; and the Quaternary was 1000—3500 m thick in the southern Okinawa Trough. The west slope of the trough and the adjacent area were abundant in organic matter of which organic carbon content occupied 0.75%—1.25%. The high sedimentation rate and great thickness should be favorable for organic matter burial and transformation. On the other hand, faults in NE-SW parallel to the trough strike crosscut frequently those in NW-SE direction, of which those in NE-SW changed into NEE-SWW in the south part of the trough. These faults provided advantageous condition for gas hydrate accumulation. Therefore, there are several kinds of structures related to the gas hydrate presence in the study area, such as submarine canyons, slides and slumps, mud diapirs and faulted block ridges.

Key words Okinawa Trough, Slope, Geologic structures, Gas hydrate