

# 南海北部陆坡区新近系沉积体系特征与 天然气水合物分布的关系

于兴河<sup>1</sup> 张志杰<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学能源学院, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:**南海北部陆坡区新生界含有丰富的油气资源和各种矿产资源, 对其沉积体系的分析可以指导资源勘探和开发。笔者在对南海北部陆坡区的西沙海槽和东沙海域的地震剖面解释与研究的基础上, 依据“外部形态+内部属性”的分类原则, 在中新世以来的沉积层中共识别出8种典型的地震相: 席状平行相、席状波形成、席状空白相、席状杂乱相、席状前积相、帚状前积相、透镜状前积相和丘状杂乱相。结合地震相分析, 在南海北部陆坡区识别出6种典型的沉积体系: 三角洲体系、等深流、低位扇、滑塌块体、浊积扇和扇三角洲体系; 其中等深流、滑塌块体和各种扇体的前缘与BSR分布的吻合率最高, 是最有利于天然气水合物聚集成矿的相带。

**关键词:**南海北部陆坡区; 新近系; 沉积体系; 等深流; 天然气水合物

**中图分类号:** P618.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2005)03-0470-07

南海北部为拉张型被动大陆边缘, 其陆架海相新生代巨厚沉积层中富含丰富的油气资源, 珠江口盆地、台西南盆地、北部湾盆地和莺歌海盆地的油气勘探实践已证实了这一点。近年来, 随着天然气水合物研究的开展, 在南海北部陆坡区发现了众多有利于天然气水合物聚集的区域<sup>[1-2]</sup>, BSR (Bottom Simulating Reflector, 似海底反射)、碳酸盐棒壳、氯离子等方面的证据都证明中国南海北部陆坡区明显存在着天然气水合物。因此, 了解其沉积体系特征对各种资源和矿产的勘探具有重要意义, 尤其对天然气水合物的分布具有极为重要的作用。

## 1 研究区概况

南海是西太平洋最大的边缘海之一, 属半封闭海性质。北部陆坡区地形复杂, 呈现出高地与洼地相间、海槽与海脊(岛)并存的多种类型地貌的特点(图1), 北部陆坡区总面积 $21 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占南海总面积的6%<sup>[3-5]</sup>, 地形的复杂性增加了地质学家对沉积体系解释的难度。

南海北部陆坡区为华南陆架向海内的延伸, 其展布方向大致平行于NE向的海岸线, 其内有一系列阶梯状正断层及其所围限的基底地堑和地垒。基底地堑控制着新生代断拗盆

地的形成和发展, 盆地中充填有巨厚的海相沉积, 为拉张型或离散型边缘<sup>[6]</sup>。而陆坡区则是陆架向深海的延伸与拓展, 同时陆架也是陆坡区的重要物源区和造成陆坡各种沉积体系形成的基础。

## 2 地震相识别

地震相是沉积环境所形成的地震特征, 是沉积体外形、岩层叠置形式以及岩性差异在空间上组合的综合反映, 它们分别与地震相单元的外形、地震反射构造和地震反射结构相对应。笔者依据“外部形态+内部属性”的分类原则, 对南海北部陆坡区的西沙海槽和东沙海域18300 km的地震资料进行分析, 在中新世以来的沉积层中共识别出8种典型的地震相(表1)。

### 2.1 席状平行相

席状平行相是海相沉积中最常见的地震相单元。该地震相单元振幅一般较高, 中一高频, 连续性极好, 席状相单元的上、下界面与其间的同相轴均为平行或近平行, 厚度相对稳定, 一般呈大面积分布, 其横向范围比地层厚度大得多, 通常是以垂向加积作用为主的沉积产物, 可代表浅海、半深海、深海等稳定沉积环境或滨浅海、三角洲平原等不稳定沉积环境。

收稿日期: 2004-09-06; 改回日期: 2005-01-01

基金项目: 国土资源部中国地质调查局国家专项(SHW010-01)与科技部重大国际合作项目(2002aa615200)资助。

作者简介: 于兴河, 男, 1958年生, 教授, 博士生导师, 主要从事油气储层沉积学、海洋资源与含油气盆地分析研究; E-mail: yxh@cugb.edu.cn。

## 2.2 席状波形相

该地震相仅在东沙海域发育,是一种极为典型的地震相,外部几何形态为席状,顶面和底面呈波形平行,内部反射结构以起伏的波形为主,似海面上的波浪般起伏,中—高幅,频率一般较高,连续性中等—好,总体厚度相对均一。这种地震相通常发育于海底浅表层或新近系以来的地层中,代表了洋流、底流或等深流等高能沉积环境下形成的波形起伏形地震反射结构。工区内主要分布于上新统与第四系中。

## 2.3 席状空白相

外部几何形态为席状,上、下界面平行,内部基本无反射。从沉积学角度上来说,空白相反映了沉积地层相对均质,可以是块状细粒沉积,也可以是厚层粗粒沉积。就天然气水合物资源而言,地层赋存天然气水合物时,通常显示出地震的空白效应,也就是说,振幅空白可能是沉积物孔隙充填天然气水合物造成的<sup>[7-9]</sup>。因此,在气水合物层内部应能观察到地震反射振幅降低,且作为一个典型特征,空白效应与填充于主沉积物中的气水合物量成正比,水合物越多,声阻抗越低。

## 2.4 席状杂乱相

杂乱地震相是一种内部不连续、不整齐的反射单元,缺少有序排列的波阻抗界面,反射振幅一般较强,频率较小。代表能量变化不稳定且能量相对较高环境下的沉积产物,可能是较深水重力流沉积造成,或是沉积体内含有气水合物,且内部分布不均匀,造成的地震反射面不连续。

## 2.5 席状前积相

其特征是缺失顶积层,其前积层向上方以顶超方式终止于地层单元的顶界上。顶超的存在表明,顶积层不是因后期构造侵蚀而缺失,而是由于在水平面相对静止时期可容纳空间保持不变,使水平面以上无法发生垂向加积作用,路过的沉积物只能在沉积体前缘带加积,从而缺失顶积层,底积层发育表明在沉积体的前方沉积了大量物质,而根据沉积分异原理,较粗的碎屑物质应在前积层及顶积层的部位上卸载,在与底积层对应的地区则主要为细粒沉积物。该相通常在水平面相对静止时期系列或鸟足状三角洲中易发育。

## 2.6 帚状前积相

顾名思义,该地震相形似扫帚,内部呈明显的下超型前积,其上倾方向存在明显的席状平行相,在剖面上整体呈发散特征。一般发育于陆架与陆坡过渡区,与盆地的快速构造下沉有关,而且这种下沉可能与盆地边缘的断裂活动有关。可解释为近岸水下扇、扇三角洲、河口坝型三角洲等沉积相。

## 2.7 透镜状前积相

外形为梭形透镜状,内部以“S”形前积层为主要反射特征,具有顶积层、前积层和底积层<sup>[10]</sup>。内部发育一组相互叠置的反“S”形反射同相轴,在反“S”形的上端为近水平的顶积层,中部为倾斜的前积层,向下同相轴逐渐变得平缓,形成底积层。顶积层发育表明当时该地区的水平面处于相对上升状态,可容纳空间增大,从而陆源物质得以向上垂向加积。底积层发



图1 南海海底地貌与研究区位置图<sup>[9]</sup>

Fig.1 Location of the study areas and sea-bottom geomorphology of the South China Sea (SCS)

育表明在沉积体的前方也沉积了大量物质,而根据沉积分异原理,较粗的碎屑物质应在前积层及顶积层的部位上卸载,在与底积层对应的地区则主要为细粒沉积物。通常在斜坡扇和砂质丰富的吉尔伯特型或粗粒三角洲中容易发育这种反射构造。

## 2.8 丘状杂乱相

丘状杂乱相以同相轴的“底平和顶凸”为特征,底部的同相轴连续平缓,顶部的同相轴上凸,形成沙丘状。内部反射结构为不明显乱岗状或杂乱状,多为中强振幅;外形形体具明显的丘状双向下超型加积,简言之,“杂乱反射、丘状下超”。通常解释为高能沉积作用的产物,代表沉积物搬运过程中的快速卸载。结合构造部位常可解释为近岸的滑塌块体、浊积扇、盆底扇或斜坡扇等,特别是在其顶面有披盖反射时,是浊积扇的极好反映,有时也可解释为扇三角洲的横切面。

## 3 典型沉积体系特征

自晚中新世以来,南海北部海平面逐渐上升,但其早期水体比较浅,主要发育滨—浅海沉积。晚中新世后期发生的海侵为北部规模最大的一次海侵,整个北部地区都处于较深水的环境,沉积了一套岸线—浅海—半深海相的地层,这次海侵一直持续到上新世早期。上新世晚期发生海退,但比较

表 1 南海北部陆坡区典型地震相类型与特征  
Table 1 Typical seismic facies types and their features on the northern continental slope of the SCS

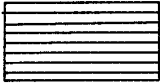
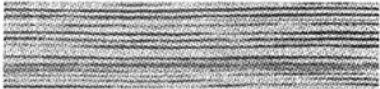








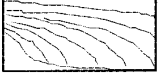



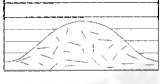

地震相	沉积学解释	模式图解	示 例
席状平行相	(冲积) 浅海平原、 浅海、深海		
席状波形相	洋流、底流、等深流		
席状空白相	细粒三角洲前缘、 地层富含水合物		
席状杂乱相	斜坡扇、浊积扇、 地层含水合物		
席状前积相	细粒三角洲、浊积扇、 鸟足状三角洲、陆坡沉积		
帚状前积相	扇三角洲、 河口坝型三角洲		
透镜状前积相	斜坡扇、砂质丰富的 吉尔伯特型三角洲		
丘状杂乱相	扇三角洲、各类扇体、 礁体、火山锥		

表 2 南海北部陆坡区典型沉积体系特征  
Table 2 Typical depositional system on the northern continental slope of the SCS

沉积相类型		地震相类型		发育部位
		纵向上	横向上	
三角洲		各种前积相	丘状相	滨海
扇三角洲		帚状前积相或透镜状前积相	丘状杂乱相	滨海
等深流		席状波形相	席状相或透镜状相	较深水, 海底平原
浊积扇		杂乱相或前积相	丘状杂乱相	半深海、深海
低位扇	盆底扇	丘状杂乱相	丘状杂乱相	较深海海盆
	斜坡扇	丘状相或透镜状前积相	丘状杂乱相	斜坡区



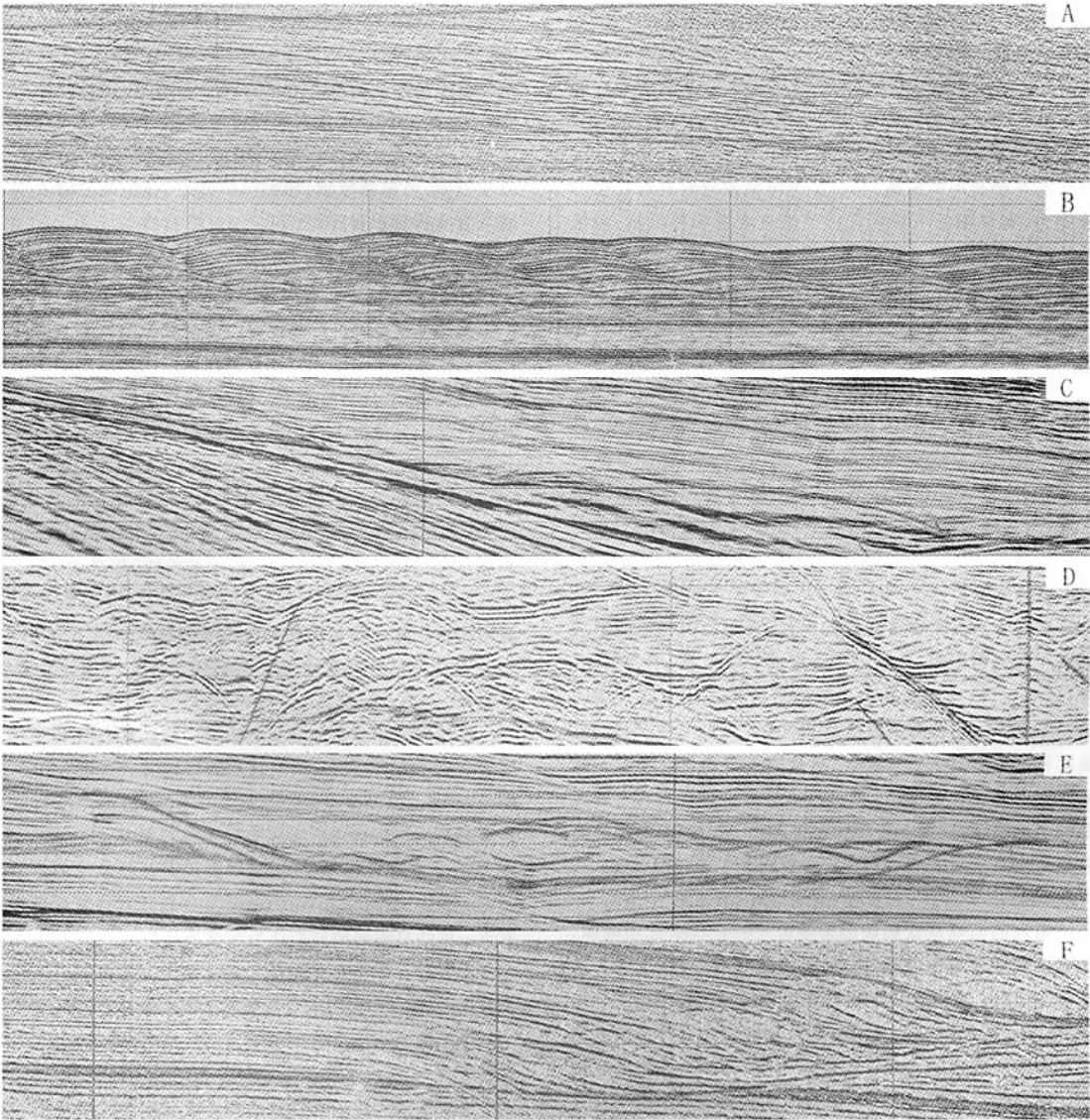


图 2 典型沉积体系地震剖面特征  
Fig. 2 Characteristics of the seismic section of typical depositional systems on the northern continental slope of the SCS

缓慢,水体下降幅度较小,以岸线—浅海地层为主。在此背景下,南海北部陆坡区发育了多种沉积体系(表 2)。

3.1 三角洲体系

由于海盆中的可容纳空间大,沉积过程持久稳定,三角洲的前积作用明显,沉积体规模大,地震相标志明显,易于识别。海盆中发育的三角洲多为高建设性三角洲,受改造破坏的影响小,三角洲特征更为突出。海盆三角洲离盆地边界较远,不受盆缘边界断层活动的控制;各种前积相是三角洲体

系在地震上最常见的响应(图 2-A),由于其规模一般较大,长、宽可在数十千米甚至上百千米,在西沙海槽和东沙海域都有保存良好的三角洲体系沉积的地震显示。

3.2 等深流沉积

随着油气勘探不断向深海推进,等深流沉积在油气勘探中的重要意义将不断显示出来。等深流就是海洋中沿海底等深线流动的底流,现代海洋中,等深流沉积覆盖了大面积的海底地区,一般为上新世和第四纪沉积,并对早期沉积物进行

改造,因此其底面通常较平缓,而其下伏地层往往仍是老地层,即早期沉积的海相泥岩。等深流沉积从水深超过5000m的深海平原到水深为500~700m的浅水台地都存在,既出现于被动大陆边缘也出现于活动的大陆边缘<sup>[1]</sup>。东沙海域东部水深3100~3300m的深海海盆内存在着明显的席状波形相,推测为大型等深流迁移沉积物的地震相响应(图2-B)。该沉积体底部有明显的滑脱面,是由于等深流发育时具有较强的侵蚀能力,对早期的沉积物进行了筛选改造和再沉积,频繁的侵蚀界面可能反映了等深流的脉动性。

### 3.3 低位扇

低位扇发育于地震层序的低水位体系域,包括盆底扇和斜坡扇,斜坡扇发育在斜坡部位,均位于层序底部,地震响应为丘状杂乱相或透镜状前积相。低位扇多为点物源供应,由于供应距离近、堆积快,沉积物结构成熟度较低,孔隙度、砂泥比高。盆底扇形成于靠近海(湖)盆中心的位置,主要是粉细砂质成分,可以沉积在峡谷出口处,也可能远离峡谷出口广泛发育;斜坡扇多沉积于斜坡上(图2-C),也可沉积在更近源的地方,其顶被低位前积楔状体所下超。

### 3.4 滑塌块体

滑塌块体是沉积物重力流的一种,重力流沉积物的形成属于事件性沉积作用,其起因于一定的触发机制,诸如洪水、地震、海啸巨浪、风暴潮和火山喷发等阵发性因素直接或间接诱使形成块体流和高密度流<sup>[12]</sup>。相似的,天然气水合物的分解使沉积物不能与水完全混合,疏松的沉积物就会随着天然气的向上运移而发生位移。研究区靠近海岸地区发育了较大范围的滑塌块体,地震上表现为杂乱相(图2-D)。滑塌块体本身也可能是由于天然气水合物分解而产生的构造效应。

### 3.5 浊积扇

三角洲的前端或盆地底部常发育一些丘状杂乱相扇体,经研究发现其常与海底峡谷和深海泥岩相联系,因此认为其可能是浊积扇。浊积扇是沉积物在浅水的沉积物受到某种外力的激发下,依靠自身的重力在超过沉积物内部粒间摩擦和吸引力造成的剪切应力后产生顺坡下滑与流动,在地势比较平坦的地方沉积的产物。其物源方向常可见到明显的下切充

填现象(图2-E),并被上覆泥岩层所上超,其前端有时也可呈前积反射构造。

### 3.6 扇三角洲

扇三角洲在南海北部陆坡区不太发育,仅东沙隆起附近偶见,代表了含有大量沉积载荷的冲积扇与海水相互作用的产物。形成扇三角洲的重要条件是海岸地形高差较大,盆缘斜坡较陡,离物源较近,物源供给充足,在地震上的表现形式通常为帚状前积相(图2-F)。

## 4 沉积体系与气水合物分布的关系

天然气水合物的形成需要一定的孔隙空间和水介质。沉积速率较高的相对较粗粒碎屑沉积区可构成良好的流体输导体系,有利于水合物的形成。因此,研究工区内沉积体系分布及其特征,对分析水合物成矿的沉积条件与沉积成矿规律十分有利。

根据国外文献的研究成果<sup>[7-9,13]</sup>,结合本地区的具体情况,认为地震剖面上的波形相、空白相、杂乱相为气水合物的有利分布区,各种快速沉积的沉积体系前缘,如滑塌块体、等深流沉积、浊积扇及三角洲前缘,是天然气水合物富集的有利沉积相带,其中等深流沉积和滑塌块体与识别出的BSR分布范围具有很好的指示性<sup>[9]</sup>,推测为最有利气水合物聚集的沉积体。

等深流沉积是海底快速沉积的一种,其成因主要有大洋密度差异、洋面风成面流、地球旋转以及海底地形与海底风暴的影响<sup>[11,14]</sup>。等深流发育于水深500~5000m的广泛海域的上新世和第四纪地层中,处于天然气水合物成藏的有利温度-压力域内,且其物性中等,因而可以认为是天然气水合物聚集的有利相带。Mountain<sup>[15]</sup>和Tucholke<sup>[16]</sup>通过对美国东海岸的布莱克-巴哈马海岭研究后认为在该地区存在一巨大的伸长状等深积岩丘,而布莱克海台又是已被证实的典型天然气水合物富集区(图3),从而进一步证明了笔者的推断。

滑塌块体本身可能是由于天然气水合物分解而产生的构造效应,是天然气水合物形成与分布的有利地质体。首先,海底滑塌块体是由沉积物快速堆积而成,地震反射特征表现为

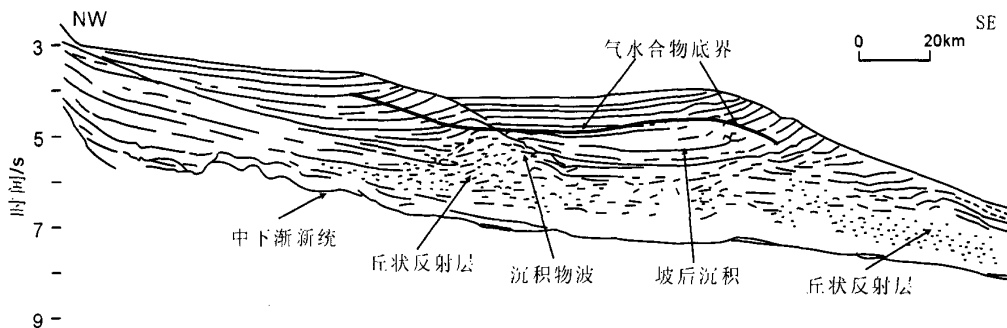


图3 布莱克外海岭等深流沉积与气水合物分布<sup>[15-16]</sup>

Fig. 3 Contourite and gas hydrate on the Blake outer ridges



杂乱反射,沉积物一般具有较高的孔隙度,为天然气水合物的形成提供所需的储集空间;其次,由于快速堆积,沉积物中的有机碎屑物在尚未遭受氧化的情况下被迅速堆积埋藏而被保存下来,经细菌作用可转变为大量的甲烷气体;再次,由于滑塌沉积物分选差渗透率低,不利于气体疏导,能较好地屏蔽压力,可为天然气水合物的形成提供很好的压力环境。

扇三角洲和三角洲体系以其良好的储层物性组合蕴藏着丰富的能源和矿物资源,这一点毋庸置疑,同样也是天然气水合物的有利聚集场所。对南海北部陆坡区的西沙海槽和东沙海域的研究发现,象征水合物存在的典型标志——BSR与三角洲和各类扇体的前缘有着较好的相关性<sup>[4]</sup>,需要进一步证实的是有BSR显示的地方就赋存有气水合物。国外加拿大西北的马更些三角洲地区研究也表明气水合物可在三角洲前缘沉积<sup>[13]</sup>。

## 5 结论

(1) 南海北部陆坡区新近系可识别出8种典型地震相:席状平行相、席状波形相、席状空白相、席状杂乱相、席状前积相、帚状前积相、透镜状前积相和丘状杂乱相。

(2) 整个南海北部地区在新近系处于相对较深水环境,沉积了一套浅海一半深海地层,并在此背景下发育了6种特征沉积体系:三角洲、等深流、低位扇、滑塌块体、浊积扇和扇三角洲体系。

(3) 地震剖面上的波形相、空白相、杂乱相为天然气水合物的有利分布区,各种快速沉积的沉积体系前缘,如滑塌块体、等深流沉积、三角洲或扇三角洲前缘及浊积扇,是天然气水合物富集的有利沉积相带,其中等深流沉积和浊积砂体是最有利天然气水合物聚集的沉积体。

## 参考文献(References):

- [1] 祝有海,张光学,卢振权,等.南海天然气水合物成藏条件与找矿背景[J].石油学报,2001,22(5):6~10.  
Zhu Youhai, Zhang Guangxue, Lu Zhenquan, et al. Gas hydrate in the South China Sea: background and indicators [J]. Acta Petroleii Sinica, 2001, 22(5): 6~10 (in Chinese with English abstract).
- [2] 姚伯初,万玲,吴能友.大南海地区新生代板块构造活动[J].中国地质,2004,31(2):113~122.  
Yao Bochu, Wan Ling, Wu Nengyou. Cenozoic plate tectonic activities in the Great South China Sea Area [J]. Geology in China, 2004, 31(2): 113~122 (in Chinese with English abstract).
- [3] 刘光鼎.中国海区及邻域地质地球物理图集[M].北京:科学出版社,1993.  
Liu Guangding. The Geological and Geophysical Map of China Sea and Neighbourhood [M]. Beijing: Science Press, 1993 (in Chinese).
- [4] 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.  
Yu Xinghe, Zhang Zhijie, Su Xin, et al. Primary discusses on accumulated conditions for sedimentation of gas hydrate and its distributions in South China Sea [J]. 2004, 11(1): 311~315 (in Chinese with English abstract).
- [5] 冯文科,鲍才旺.南海地形地貌特征[J].海洋地质研究,1982,(4):23~32.  
Feng Wenke, Bao Caiwang. The topographical and physiognomic characteristics of South China Sea [J]. Marine Geological Research, 1982, (4): 23~32 (in Chinese with English abstract).
- [6] 刘昭蜀.南海地质构造与油气资源[J].第四纪研究,2000,20(1):69~77.  
Liu Zhaoshu. Geotectonics and hydrocarbon resources in South China Sea [J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(1): 69~77 (in Chinese with English abstract).
- [7] Shipley T H, Houston M H, Buffler R T, et al. Seismic evidence for widespread possible gas hydrates horizons on continental slopes and rises [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1979, (12): 2204~2213.
- [8] Hyndman R D, Spence G D. A seismic study of methane hydrate marine bottom simulating reflectors [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97 (B5): 6683~6698.
- [9] Diaconescu C C, Kieckhefer R M, Knapp J H. Geophysical evidence for gas hydrates in the deep water of the South Caspian Basin, Azerbaijan [J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, (18): 209~221.
- [10] 徐怀大,王世凤,陈开远.地震地层学解释基础[M].武汉:中国地质大学出版社,1990.  
Xu Huaida, Wang Shifeng, Chen Kaiyuan. Interpretation Fundamental of Seismic Stratigraphy [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1990 (in Chinese with English abstract).
- [11] 高振中.深水牵引流沉积——内潮汐、内波和等深流沉积研究[M].北京:科学出版社,1996.  
Gao Zhenzhong. Deep-water Tractive Current Deposits——the Study of Internal-tide, Internal-wave, and Contour Current Deposits [M]. Beijing: Science Press, 1982 (in Chinese with English abstract).
- [12] 于兴河.碎屑岩系油气储层沉积学[M].北京:石油工业出版社,2002.  
Yu Xinghe. Petroleum Reservoir Sedimentology of Clastic Rock [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002 (in Chinese).
- [13] Dallimore S R, Uchida T, Collett T S. Scientific results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada [J]. Geological Survey of Canada Bulletin, 1999, 544.
- [14] 郭建华,梁卫.大西洋洋底现代等深流及其沉积特征综述[J].地质地球化学,1994,18(6):22~26.  
Guo Jianhua, Liang Wei. Recent contour current and its sedimentary feature in Atlantic Ocean floor [J]. Geology and Geochemistry, 1994, 18(6): 22~26 (in Chinese).
- [15] Mountain G S, Tucholke B E. Mesozoic and Cenozoic geology of the U. S. Atlantic continental slope and rises [A]. In: Poag C W

- (ed.). *Geologic Evolution of the U. S. Atlantic Margin* [C]. New York: Van Nostrand Reinhold. 293~341.
- [16] Tucholke B E, Mountain G S. Tertiary paleoceanography of the western North Atlantic Ocean [A]. In: Vogt P R, Tucholke B E (ed.). *The Geology of North America, Vol. M. The Western North Atlantic Region, Decade of North America Geology* [C]. Geological Society of America, Boulder, Colo. 631~650.

## Characteristics of Neogene depositional systems on the northern continental slope of the South China Sea and their relationships with gas hydrate

YU Xing-he<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-jie<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The Cenozoic on the northern continental slope of the South China Sea contains abundant petroleum and other mineral resources, so an analysis of its depositional systems can help geologists to guide resource exploration and exploitation. On the basis of the interpretation and study of seismic sections in the Xisha trough and Dongsha sea area on the northern slope of the South China Sea and in light of the seismic facies classification principle of external geometric shape plus internal reflector configuration, eight typical seismic facies are recognized in sedimentary beds since the Miocene; they are: sheet-parallel, sheet-wavy, sheet-blank, sheet-chaotic, sheet-foreset, brush-shaped foreset, lenticular foreset and mound-chaotic facies. On that basis, six depositional systems are recognized on the northern slope of the South China Sea; they are: delta, contourite, submarine fan or slope fan, slump block, turbidite fan and fan-delta. Of these, the distribution of the contourite, slump block and fronts of deltas or fans is highly consistent with the distribution of BSR, and thus they are the most favorable facies for gas hydrate accumulation.

**Key words:** northern continental slope of the South China Sea; Neogene; depositional system; contourite; gas hydrate

**About the first author:** YU Xing-he, male, professor and director of Ph.D candidate, mainly engages in the study of petroleum reservoir sedimentology, marine resources and petroleum-bearing basins; E-mail: yxh@cugb.edu.cn.