

文章编号: 0253-2697(2009)01-0022-05

# 琼东南盆地深水区多边形断层的发现及其油气意义

吴时国<sup>1,2</sup> 孙启良<sup>1,3</sup> 吴拓宇<sup>4</sup> 袁圣强<sup>1,3</sup> 马玉波<sup>1,3</sup> 姚根顺<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室 山东青岛 266071; 2 中国石油大学地球资源与信息学院 山东青岛 266555;  
3 中国科学院研究生院 北京 100049; 4 中国地质大学地球科学学院 湖北武汉 430074)

**摘要:** 在高精度的三维地震资料基础上,利用层拉平和相干切片技术,在南海北部琼东南盆地首次发现多边形断层。多边形断层是一种非构造成因的断距微小的张性断层。琼东南盆地深水区的多边形断层长度为150~1500 m,间距为150~3000 m,断距为10~40 m,倾角为50°~90°,发育在3个层位。琼东南盆地可以分为裂谷断陷期和裂后热沉降期两个演化阶段;裂后热沉降期构造断裂不发育,缺乏连接烃源岩和储层的通道,不利的油气疏导系统成为制约该期成藏最主要的因素之一。多边形断层的存在可以有效地解决这个问题,它可作为油气运移的疏导体系,使下部生油层中的油气向上运移成藏,对南海北部裂后热沉降期油气运聚具有重要的意义。

**关键词:** 琼东南盆地;深水区;多边形断层;油气运移通道;油气成藏

**中图分类号:** TE111.2 **文献标识码:** A

## Polygonal fault and oil-gas accumulation in deep-water area of Qiongdongnan Basin

WU Shiguo<sup>1,2</sup> SUN Qiliang<sup>1,3</sup> WU Tuoyu<sup>4</sup> YUAN Shengqiang<sup>1,3</sup> MA Yubo<sup>1,3</sup> YAO Genshun<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment in the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Faculty of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;  
3. Graduate Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
4. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** According to 3D high-resolution seismic data, polygonal faults were discovered firstly in Qiongdongnan Basin of the northern continental margin of South China Sea by using the coherent slice and flattening technique. The polygonal fault is tensional fault system with small throws, which is of nontectonic origin. The polygonal fault in the deep-water area of Qiongdongnan Basin has a length from 150 meters to 1500 meters, an interval space from 50 meters to 3000 meters, a fault throw from 10 meters to 40 meters and a dip from 50° to 90° in three layers. Qiongdongnan Basin underwent the syn-rift stage and the post-rift thermal subsidence stage. The tectonic faults were undeveloped in the post-rift stage, which leads to the absence of pathway between source rock and reservoir. The unfavorable migration system is one of the factors restricting oil and gas accumulation in the post-rift stage. The polygonal fault can efficiently serve as the pathway for linking source rock and reservoir to enhance hydrocarbon migration along the polygonal fault. So it is very favorable for oil and gas migration and accumulation in the post-rift stage of the northern South China Sea.

**Key words:** Qiongdongnan Basin; deep-water area; polygonal fault; oil-gas migration pathway; oil-gas accumulation

多边形断层是指具有微小断距的张性断层系,因其在平面上呈多边形,故将其命名为多边形断层<sup>[1]</sup>。就全球范围而言,多边形断层仅局限于白垩纪和新生代盆地。在白垩纪以前的地层中没有发现多边形断层,分析认为可能有两种原因造成了这种现象:①随着埋深增加,经历垂向压实,多边形断层微小的断距(<50 m)被压缩,断距不明显,超出地震的分辨率,不易被识别出来<sup>[2]</sup>,并且随着深度的增加,这种情况尤其严重;②白垩纪以前的深水环境沉积的地层保留较少,

难以引起有关人员的关注。多边形断层对深水油气和天然气水合物系统中流体的运移、聚集成藏及逸散等有重要的影响,如砂岩储层渗透层<sup>[3-7]</sup>、流体的运移聚集和逸散<sup>[8-13]</sup>等问题。

由于多边形断层断距小、延伸短、密度大,所以开展该断层研究,需要高精度二维或三维地震资料。研究多边形断层一般采用两种方法,即相干切片法和逐线解释法<sup>[14-15]</sup>。相干切片技术,主要根据信号的相干性分析原理,计算三维数据体中所有相邻道之间的相

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB411703),中国科学院知识创新项目(KZCX2-YW-203)和山东省泰山学者建设工程基金联合资助。

**作者简介:** 吴时国,男,1963年9月生,1984年毕业于中国地质大学(武汉),1998年获德国汉堡大学博士学位,2000年日本海洋科学研究中心博士后出站,现任中国科学院海洋研究所研究员,博士生导师,中国石油大学特聘教授,主要从事海底构造与地球物理研究工作。

E-mail: swu@ms.qdio.ac.cn

干性。在断层切割的部位,地震资料的相干性出现了一个明显的差异,存在着不连续性,因此可在切片上有效地识别出断层<sup>[16-18]</sup>。而逐线解释法是对地震每条测线进行逐一解释的方法,一般每条线之间的间距为 12.5~15 m<sup>[19]</sup>。该文根据南海北部最新的三维地震资料,利用层拉平技术和相干切片技术,有效地揭示了南海北部多边形断层的特征。

## 1 新生代地层层序

### 1.1 区域地质背景

研究区位于琼东南盆地南部(图 1),水深为 1000~1500 m,属于中陆坡区。琼东南盆地是南海北部陆缘张裂而形成的一个叠合盆地,经历古近纪的张裂和新近纪以来热沉降过程,沉积了巨厚的地层,最大沉积厚度超过 8 km,最大埋深超过 9.4 km。研究区从始新统至今具有双物源供给的特点,即南、北两个方向的物源,且以南部物源供应为主,北部物源供给相对不足。

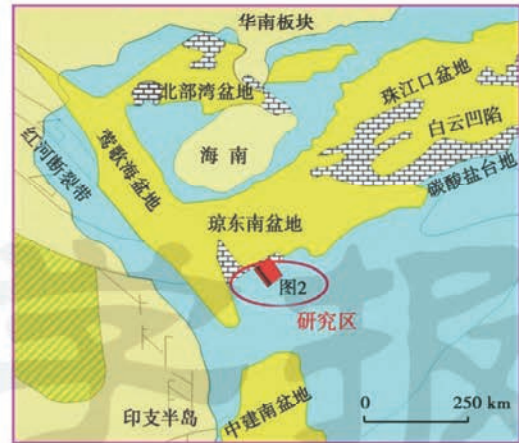


图 1 研究区构造位置

Fig. 1 Structure location of the interested region

琼东南盆地梅山组与黄流组之间的反射界面( $T_{40}$ )附近为细粒的大套泥岩,泥岩段之上和之下为大套的砂岩(表 1)。这与英国北海盆地多边形断层发

表 1 琼东南盆地地层层序与海平面曲线

Table 1 The stratigraphic sequence and sea level curve of Qiongdongnan Basin

地层单元				反射界面绝对年龄 / Ma	构造层序	岩性剖面	海平面升降曲线 / m		沉积旋回	沉积相	沉积环境
系	统	组	段				相对海平面	全球海平面			
							200 100 0	200 100 0			
第四系	更新统	乐东组		$T_{20}$ — 2.6	坳陷期	[岩性剖面]	[相对海平面升降曲线]	[全球海平面升降曲线]	[沉积旋回]	浅海-半深海相	准被动大陆边缘
新近系	上新统	莺歌海组		$T_{30}$ — 5.5							
		上黄流组	粉砂质泥岩、块状泥岩	$T_{40}$ — 10.5							
		中梅山组	粉砂岩、生物碎屑灰岩、泥岩	$T_{50}$ — 15.5							
古近系	中新统	下三亚组	细砂岩不等粒砂岩与泥岩互层	$T_{60}$ — 23.3	断陷期	[岩性剖面]	[相对海平面升降曲线]	[全球海平面升降曲线]	[沉积旋回]	浅海-半深海相	海相
		一段陵水组	砾状砂砾岩、深灰色泥岩、粉-细砂岩	$T_{70}$ — 29.3							
		二段崖城组	砂砾岩不等粒砂岩、深灰色泥岩 / 砂质泥岩夹煤层	$T_{80}$ — 32							
始新统	岭头组	三段		$T_{100}$ — 53.5	南海运动	[岩性剖面]	[相对海平面升降曲线]	[全球海平面升降曲线]	[沉积旋回]	滨浅海相	海陆过渡
		始新统									
前第三系						[岩性剖面]					

育区岩性地层结构相似。在研究区,发育有3套烃源岩,复合水道砂岩和生物礁为良好的储层,岩性—构造圈闭为主要圈闭类型。前人认为缺少连通烃源岩的断裂系统是研究区内含油气系统的最不利因素。但多边形断层的发现改变了这种认识,它可以作为流体运移的通道,在一定程度上解决这个问题。

## 1.2 层序界面

自下而上,琼东南盆地发育几个重要的层序界面(表1),如裂陷不整合面( $T_{70}$ )、断拗转换面( $T_{60}$ )、大型海底峡谷侵蚀面( $T_{30}$ )等。在盆地南部研究区内 $T_{70}$ 界面表现为典型的削蚀特征,削蚀特征在研究区西北部的主洼附近最为明显。 $T_{60}$ 是琼东南盆地区域性的断拗转换面,也是全区可以连续追踪的一个明显的不整合面。 $T_{40}$ 和 $T_{50}$ 反射界面是一套强波组顶底界面; $T_{30}$ 界面上大型侵蚀谷非常发育。

## 1.3 层序特征

琼东南盆地以 $T_{60}$ 为分界面可以划分为裂谷断陷期和裂后热沉降期两个巨层序<sup>[20]</sup>(表1)。 $T_{60}$ 之下为裂谷断陷期层序,其特点是断裂非常发育,并且断裂控制沉积,沉积厚度差异大; $T_{60}$ 之上为裂后热沉降期层序,其特点是构造断裂不发育,断裂不控制沉积,沉积层序更加稳定,厚度变化较小。琼东南盆地整体地层最厚的地方是其西北部主洼带,其南部和东部地区处于隆起带上,地层相对较薄。

## 2 多边形断层发育的几何特征

在琼东南盆地南部,多边形断层主要发育于中新世梅山组上部和黄流组下部的泥岩中。地震剖面的精细解释发现 $T_{40}$ 被小尺度的断层错断明显(图2)。对 $T_{40}$ 经过层拉平处理后,再对 $T_{40}$ 上下300ms的三维地震资料进行相干切片技术研究。结合岩性资料, $T_{40}$ 附近(梅山组顶,黄流组底)为大套泥岩(表1),有利于多边形断层的发育。

从地震剖面对不同时间的相干切片分析,发现多边形断层主要发育在 $T_{40}$ 之上140ms和之下140ms之间,即梅山组顶部和黄流组底部,多边形断层发育段厚约252m。根据多边形断层发育的密度和断距大小又可以细分为3个层段的多边形断层(图2)。层1位于 $T_{40}$ 之上约140ms~60ms,约在100ms处最为发育[图3(a)],厚约72m;层2位于 $T_{40}$ 之上约60ms~10ms,约在36ms处最为发育[图3(b)],厚约45m;层1和层2都位于黄流组底的泥岩中。层3位于 $T_{40}$ 之上10ms至 $T_{40}$ 之下140ms处,约在 $T_{40}$ 之下24ms处的梅山组内最为发育[图3(c)],厚约135m。层1和层2与层3相比分布范围小,断距小,向下延伸

短。梅山组内的层3多边形断层的相干切片特征十分明显,断层密度大,断距大,延伸远,向下逐渐减少(图2和图3)。

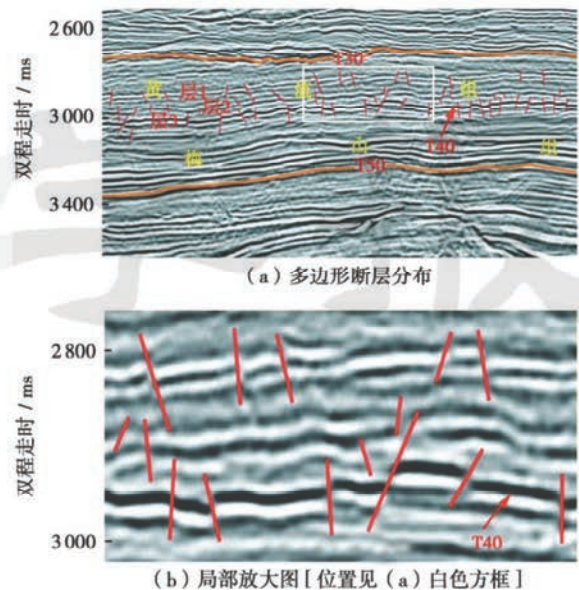


图2 多边形断层层位分布和局部放大特征

Fig. 2 The distribution of polygonal fault and partial enhanced characteristics

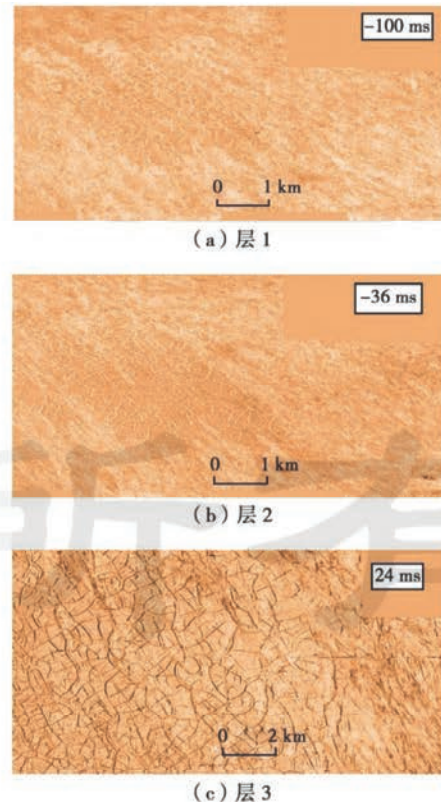


图3 琼东南盆地局部地区3个主要多边形断层发育层段的相干切片

Fig. 3 The partly coherence slices of three main polygonal fault intervals of Qiongdongnan Basin

多边形断层的长度为 150~1500 m, 85% 集中在 1000 m 范围内。层 1 和层 2 内多边形断层的间距为 300~3000 m; 层 3 的间距较小, 为 150~1000 m, 大部分集中在 150~500 m 范围内。断距为 10~40 m, 层 1 和层 2 一般为 20 m; 层 3 稍大些, 一般为 30 m。倾角为  $50^{\circ}$ ~ $90^{\circ}$ , 3 个多边形断层发育层段相比, 层 2 稍微小些为  $50^{\circ}$ ~ $70^{\circ}$ , 层 3 多边形断层倾角较大, 为  $70^{\circ}$ ~ $90^{\circ}$ 。这些断层在平面上呈多边形形态, 间距小, 密度大, 与北海盆地等地区发现的多边形断层非常相似<sup>[1,3]</sup>。

### 3 多边形断层的影响因素

多边形断层的形成受多种因素的影响, 其中岩石物性、矿物成分和含量、构造应力以及成岩作用等对其影响均较大。由于目前研究区内尚没有钻井资料, 所以对岩石物性和成岩作用等影响因素的研究会有一些困难, 目前主要靠地震属性以及邻近区的井资料对比对其进行研究。

多边形断层绝大多数发育在泥岩、页岩等细粒沉积物中。粒度和矿物成分及含量对其影响很大, 大颗粒物质增加颗粒间凝胶体的黏度不利于多边形断层的形成<sup>[21]</sup>。实验表明, 沉积物中仅仅有 2% 的蒙脱石, 就能够发生脱水收缩形成多边形断层<sup>[2]</sup>。蒸发岩中的矿物石膏, 在一定的温压条件下, 也能发生脱水反应促进多边形断层的形成<sup>[11]</sup>。

层 3 几乎发育于整个研究区, 而层 1 和层 2 的发育范围则非常有限, 这可能是由于沉积物粒度变粗或者蒙脱石等矿物的减少所引起的(图 3)。另外, 除了沉积物内部成分发生变化会影响多边形断层发育外, 外部岩性的变化也会影响多边形断层的发育。在研究区内, 多边形断层之上的水道浊积砂岩发育地区, 在泥岩内部形成高压环境的过程中, 由于砂岩储集体物性好, 其下部泥岩内的流体向浊积体内运移, 一定程度上缓解了其下泥岩的高压环境, 不利于泥岩层中多边形断层的发育, 导致了水道浊积砂体下泥岩中的多边形断层发育减少(图 4)。

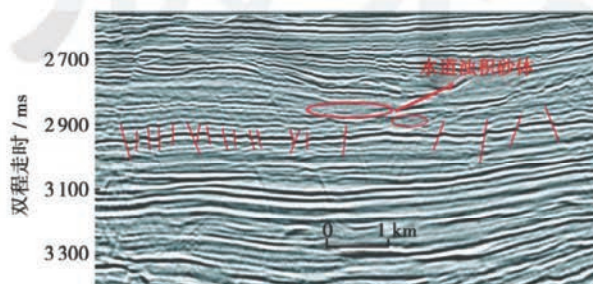


图 4 水道浊积砂体对多边形断层发育的影响

Fig. 4 Influence of channel turbidity sandstone on the development of polygonal faults

成岩作用对多边形断层形成和分布有着重要的影响<sup>[2]</sup>, 它多形成于沉积物的浅埋成岩阶段, 多边形断层是一种非构造成因的断层, 但是多边形断层却受区域构造不同程度的影响。其中构造断层、褶皱和火山侵入岩体等对多边形断层影响较大。多边形断层一般在背斜的脊部被强化, 密度变大, 呈放射状散开<sup>[22]</sup>。构造断层的存在可以改变局部应力场的方向, 使最大张应力的方向由垂直于断层走向改变为平行于断层走向, 从而造成多边形断层与构造断层一般呈直角相交的关系<sup>[2]</sup>。

火山岩对多边形断层也有重要的影响。在研究区内发育一个较大的火山岩体, 在火山岩体周围多边形断层的形态发生了明显的变化, 由原来走向的杂乱无章转变为以火山岩体为中心的放射状分布(图 5)。

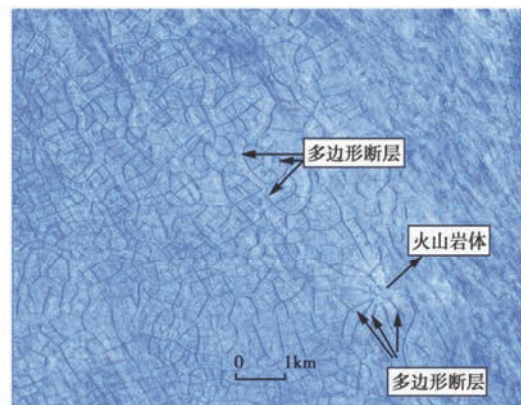


图 5 火山岩体与多边形断层的关系

Fig. 5 The relationship between intrusive body and polygonal faults

### 4 深水油气意义

多边形断层不仅对油气的一次成藏起着重要的作用, 也可能对油气的二次成藏起着重要的作用。多边形断层发育层之下的梅山组具有生物礁和复合水道砂岩等良好的储层; 发育有多边形断层的黄流组的泥岩为其盖层。多边形的发育, 破坏了盖层的完整性, 导致已经成藏于生物礁中的油气向上运移。在黄流组之上发育有许多大型的深切谷砂体, 经过多边形断层运移的油气在此可能再次聚集成藏。

多边形断层作为油气运移通道在世界很多地区都存在。如刚果盆地<sup>[12]</sup>和挪威海岸<sup>[23]</sup>等地区。在刚果盆地先期成藏于复合水道砂岩中的天然气沿多边形断层向上运移, 在适当的温压条件下形成天然气水合物, 对后期运移的气体起了阻挡作用<sup>[12]</sup>。多边形断层不仅能为流体提供通道, 而且也为砂体的上侵提供通道<sup>[6]</sup>。上侵的砂体不仅有利于油气的运移, 同时也可以为油气储集提供空间<sup>[14]</sup>。

在研究区内,裂谷断陷期和裂后热沉降期共发育三套烃源岩;梅山组发育的生物礁和复合水道砂体以及黄流组之上的深切谷砂岩是潜在的油气储层<sup>[24]</sup>;圈闭主要为地层岩性圈闭,黄流组及其以上的大套泥岩为良好的盖层<sup>[25]</sup>。但缺乏储层与烃源岩相联系的断裂系统,使之成为研究区裂后热沉降期含油气系统的最不利的因素。在对研究区高精度三维地震资料分析后发现,研究区发育大量的多边形断层,其可以作为一种很好的油气运移通道。发育在T<sub>40</sub>上下的多边形断层能够为梅山组烃源岩产生的油气向下部的梅山组生物礁或复合水道砂岩以及其上的黄流组深切谷砂岩油气运移提供有效的通道。多边形断层的存在对研究区裂后热沉降期的油气运移成藏起着重要的作用。

## 5 结论

琼东南盆地南部的多边形断层主要发育在梅山组的上部和黄流组的下部,其中在梅山组上部的特征最为明显,但是在黄流组发育的层位较多。多边形断层长度一般为150~1500 m,间距为150~3000 m,断距为10~40 m,倾角为50°~90°。

多边形断层对研究区内的储层物性、油气运移和聚集起着重要的作用。在研究区裂后热沉降期生、储、盖等条件搭配较好,但是油气运移通道比较缺乏。多边形断层的存在,可以为油气的运移提供通道,有效地解决了这个问题。但是,多边形断层的存在也可能破坏梅山组的储层,造成油气的二次运移和聚集,有利于黄流组之上的深切谷砂岩的油气成藏。因此,多边形断层也可能是研究区内油气二次成藏的运移通道。

## 参 考 文 献

- [1] Cartwright J A. Episodic basin-wide hydrofracturing of overpressured Early Cenozoic mudrock sequences in the North Sea Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1994, 11(5): 587-607.
- [2] Hansen D M, Shimeld J W, Williamson M A, et al. Development of a major polygonal fault system in Upper Cretaceous chalk and Cenozoic mudrocks of the Sable Subbasin, Canadian Atlantic margin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21(9): 1205-1219.
- [3] Lonergan L, Cartwright J, Jolly R. The geometry of polygonal fault systems in Tertiary mudrocks of the North Sea [J]. *Journal of Structural Geology*, 1998, 20(5): 529-548.
- [4] Stuevold L M, Faerseth R B, Arnesen L, et al. Polygonal faults in the Ormen Lange Field, More Basin, offshore Mid Norway [G] // *Polygonal faults and sediment mobilization*. Geology Society, London, Special Publications, 2003, V216: 263-281.
- [5] Panien M, Moretti I, Calassou S. Analogical model of the deformation of sandy submarine channels in shaly pelagic sediments [J]. *Oil & Gas Science and Technology—Revue de L'IFP*, 2001, 56(4): 319-325.
- [6] Larter S, Aplin A C, Bowler B, et al. A drain in my graben: An integrated study of the Heimdal area petroleum system [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69-70: 619-622.
- [7] Victor P, Moretti I. Polygonal fault systems and channel boudinage: 3D analysis of multidirectional extension in analogue sandbox experiments [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(7): 777-789.
- [8] Davies R J, Cartwright J A. Kilometer-scale chemical reaction boundary patterns and deformation in sedimentary rocks [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 262(1/2): 125-137.
- [9] Trincardi F, Cattaneo A, Correggiari A, et al. Evidence of soft sediment deformation, fluid escape, sediment failure and regional weak layers within the late Quaternary mud deposits of the Adriatic Sea [J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1/4): 91-119.
- [10] Bizz S, Mienert J, Berndt C. Geological controls on the Storegga gas-hydrate system of the mid-Norwegian continental margin [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 209(3/4): 291-307.
- [11] De Paola N, Collettini C, Trippetta F, et al. A mechanical model for complex fault patterns induced by evaporite dehydration and cyclic changes in fluid pressure [J]. *Journal of Structural Geology*, 2007, 29(10): 1573-1584.
- [12] Gay A, Lopez M, Cochonat P, et al. Evidences of early to late fluid migration from an upper Miocene turbiditic channel revealed by 3D seismic coupled to geochemical sampling within seafloor pockmarks, Lower Congo Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(3): 387-399.
- [13] Gay A, Lopez M, Cochonat P, et al. Isolated seafloor pockmarks linked to BSRs, fluid chimneys, polygonal faults and stacked Oligocene-Miocene turbiditic palaeochannels in the Lower Congo Basin [J]. *Marine Geology*, 2006, 226(1/2): 25-40.
- [14] Cartwright J A, Dewhurst D N. Layer-bound compaction faults in fine-grained sediments [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1998, 110(10): 1242-1257.
- [15] Cartwright J, Huuse M. 3D seismic technology: The geological 'Hubble' [J]. *Basin Research*, 2005, 17(1): 1-20.
- [16] 余德平, 曹辉, 郭全仕, 等. 应用三维相干技术进行精细地震解释 [J]. *石油物探*, 2000, 39(2): 83-88.  
She Deping, Cao Hui, Guo Quanshi, et al. 3-D coherence cube technique applied to fine interpretation [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2000, 39(2): 83-88.
- [17] 张向君, 李幼铭, 钟吉太, 等. 三维相干切片断层多边形检测 [J]. *物探化探计算技术*, 2001, 23(4): 295-298.  
Zhang Xiangjun, Li Youming, Zhong Jitai, et al. Fault polygon detecting in 3D coherence slice [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2001, 23(4): 295-298.
- [18] 罗振丽, 张爱敏, 丁在宇. 相干体技术和图像处理技术在检测断层中的应用 [J]. *中国煤田地质*, 2004, 16(3): 48-50.  
Luo Zhenli, Zhang Aimin, Ding Zaiyu. Synthesical application of coherence cube technology and image manipulation technology in fault detection [J]. *Coal Geology of China*, 2004, 16(3): 48-50.

- Journal of Geophysics, 2000, 43(6): 771-779.
- [28] 邱楠生, 王绪龙, 杨海波, 等. 准噶尔盆地地温分布特征[J]. 地质科学, 2001, 36(3): 350-358.  
Qiu Nansheng, Wang Xulong, Yang Haibo, et al. The characteristics of temperature distribution in the Junggar basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36(3): 350-358.
- [29] Yang Shuchun, Hu Shengbiao, Cai Dongsheng, et al. Present-day heat flow, thermal history and tectonic subsidence of the East China Sea Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(9): 1095-1105.
- [30] 杨树春, 胡圣标, 蔡东升, 等. 南黄海南部盆地地温场特征及热-构造演化[J]. 科学通报, 2003, 48(14): 1564-1569.  
Yang Shuchun, Hu Shengbiao, Cai Dongsheng, et al. Geothermal characteristics and tectonothermal evolution of the southern area of South Yellow Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14): 1564-1569.
- [31] 胡圣标, 何丽娟, 汪集旻. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 611-626.  
Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. Compilation of heat flow data in the China continental area (3rd edition) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(5): 611-626.
- [32] 施小斌, 周蒂, 张毅祥. 南海北部陆缘岩石圈热-流变结构[J]. 科学通报, 2000, 45(15): 1660-1665.  
Shi Xiaobin, Zhou Di, Zhang Yixiang. Lithospheric thermo-rheological structure of the northern margin of South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(15): 1660-1665.
- [33] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia [C] // Coward M P, Ries A C. Collision tectonics. Geological Society, London, Special Publications 19, 1986: 113-157.
- [34] Zoback M L, Zoback M D, Adams J, et al. Global patterns of tectonic stress[J]. Nature, 1989, 341: 291-298.
- [35] 詹文欢, 钟建强, 丘学林. 南海及邻区现代构造应力场与形成演化[M]. 北京: 科学出版社, 1993.  
Zhan Wenhuan, Zhong Jianqiang, Qiu Xuelin. The modern tectonic stress field and its evolution of South China Sea and its adjacent areas[M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [36] 詹文欢, 朱照宇, 孙龙涛, 等. 试论南海新构造运动的时限及其差异性[J]. 地质学报, 2006, 80(4): 491-496.  
Zhan Wenhuan, Zhu Zhaoyu, Sun Longtao, et al. The epoch and diversities of Neotectonic Movement in the South China Sea[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(4): 491-496.

(收稿日期 2008-01-22 改回日期 2008-04-28 编辑 王秀)

#### (上接第26页)

- [19] Cartwright J A, Lonergan L. Volumetric contraction during the compaction of mudrocks: A mechanism for the development of regional-scale polygonal fault systems[J]. Basin Research, 1996, 8(2): 183-193.
- [20] 朱伟林, 张功成, 高乐. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 1-9.  
Zhu Weilin, Zhang Gongcheng, Gao Le. Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 1-9.
- [21] Dewhurst D N, Cartwright J A, Lonergan L. The development of polygonal fault systems by syneresis of colloidal sediments[J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16(8): 793-810.
- [22] Hansen D M, Cartwright J. The three-dimensional geometry and growth of forced folds above saucer-shaped igneous sills[J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28(8): 1520-1535.
- [23] Hustoft S, Mienert J, Banz S, et al. High-resolution 3D-seismic data indicate focussed fluid migration pathways above polygonal fault systems of the mid-Norwegian margin[J]. Marine Geology, 2007, 245(1/4): 89-106.
- [24] 何仕斌, 张功成, 米立军, 等. 南海北部大陆边缘盆地深水储层类型及沉积演化[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 51-56.  
He Shibin, Zhang Gongcheng, Mi Lijun, et al. Reservoir type and sedimentary evolution in the continental margin deep water area of the northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 51-56.
- [25] 张功成, 米立军, 吴时国, 等. 深水储层——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 15-21.  
Zhang Gongcheng, Mi Lijun, Wu Shiguo, et al. Deepwater area—the new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 15-21.

(收稿日期 2008-03-18 改回日期 2008-06-25 编辑 熊英)