

非洲下刚果盆地多边形断层系统 及其对油气的意义

李士涛¹, 王振奇¹, 张笑¹, 李涛²

(1 长江大学; 2 中国石油东方地球物理公司海上事业部)

摘要 利用高精度的三维地震资料,在非洲下刚果盆地上新统一更新统识别出一种多边形断层系统。它们在地震剖面上为微小断距的张性断层,主要发育在深水、半深水环境中沉积的细粒泥质岩中。利用地震相干技术,显示其平面特征为多边形形状;断层无优势走向,属非构造成因;在一个断层层段内,具有上密下疏的特征。研究区多边形断层的形成模式是:顶部泥岩层细粒沉积物正常压实,形成致密层,阻止了下部泥岩层收缩流体的排泄,造成欠压实状态,逐渐形成多边形断层。随着地层的演化,还可以在已发育断层层位之下发育新一轮的多边形断层,同时引发上方原先的多边形断层再次活动。多边形断层的发育程度主要取决于沉积物颗粒的大小和矿物成分,随着颗粒的减小和蒙脱石含量的增加,多边形断层的发育程度会增强。多边形断层不仅可以作为油气运移的通道,而且还可以使油气沿断层向上运移后形成气水化合物,对后期的油气成藏产生封盖作用。

关键词 多边形断层;断层特征;形成机制;油气成藏;下刚果盆地

中图分类号:TE111.2 **文献标识码**:A

多边形断层系统(Polygonal fault systems),最先是由 Cartwright 根据英国北海盆地三维地震数据发现并提出的^[1],目前在世界 50 多个大陆边缘盆地中已有所发现^[2],包括我国的东海、南海及珠江口等海域盆地。多边形断层系统的研究,对深水勘探有着非常重要的意义。多边形断层也被称为“层控断层”^[3],广泛发育在较细粒沉积体系中,且在许多被动大陆边缘和克拉通沉积盆地内覆盖面积巨大。它们是具有微小断距的一种张性断层,在相干时间切片平面上呈多边形特征,为非构造成因^[4]。

目前对于多边形断层的研究已经近 20 年了,但其成因机制仍然是国内外学者争论的焦点,有密度反转^[5-7]、沉积压实^[8]、重力扩展^[9]、超压流体^[10]、沉积物脱水收缩^[3]等多种假说。笔者以非洲下刚果盆地为例,利用三维地震资料进行了多边形断层系统的研究,对其特征及形成机理有了新的认识。

1 区域地质背景

下刚果盆地属于西非被动大陆边缘裂谷盆地之

一,北邻加蓬盆地,南邻宽扎盆地,西界为大陆边缘。本次研究的三维地震工区位于下刚果盆地西北部(图 1),它位于陆架坡折以下,面积 1 760 km²,水深 500~1 200 m。下刚果盆地是在早白垩世南大西洋开启时就开始形成的,经历了拉伸裂谷运动和被动热沉降两个主要阶段,地层柱状分布如图 2 所示。

1.1 拉伸裂谷阶段

早白垩世早期冈瓦纳大陆裂解时期,地壳减薄,非洲大陆和南美大陆间发生陆内裂谷作用,形成了一系列北西—南东向克拉通裂谷盆地,进一步的拉伸作用,形成了平行海岸线的地堑和地垒。早白垩世纽康姆(Neocomian)末期发生第二次裂谷作用,形成很深的湖泊,沉积了富含有机质的深水湖相泥页岩,这是西非边缘重要的区域性烃源岩。

晚侏罗世—早白垩世阿普特期(Aptian)冈瓦纳大陆持续伸展,最终导致大陆破裂。非洲大陆西侧边缘,海水周期性地向东涌入沉积盆地,由于气候干旱,形成了局限环境的潟湖相沉积,下刚果盆地主要

收稿日期:2010-11-09

基金项目:本文受“十一五”国家重大专项(编号:2008ZX05030-03-01)资助

李士涛:1986生,2008年毕业于长江大学资源勘查工程专业,现为长江大学在读硕士研究生,主要从事层序地层及储层预测方面的研究。通讯地址:434023 湖北省荆州市

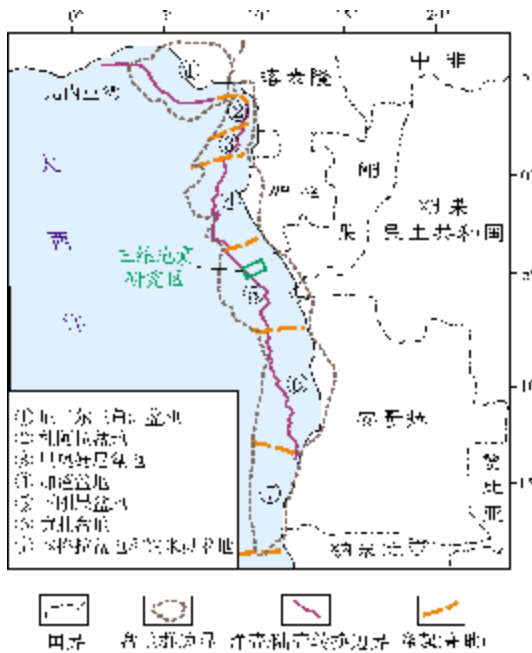


图1 下刚果盆地地理位置示意图

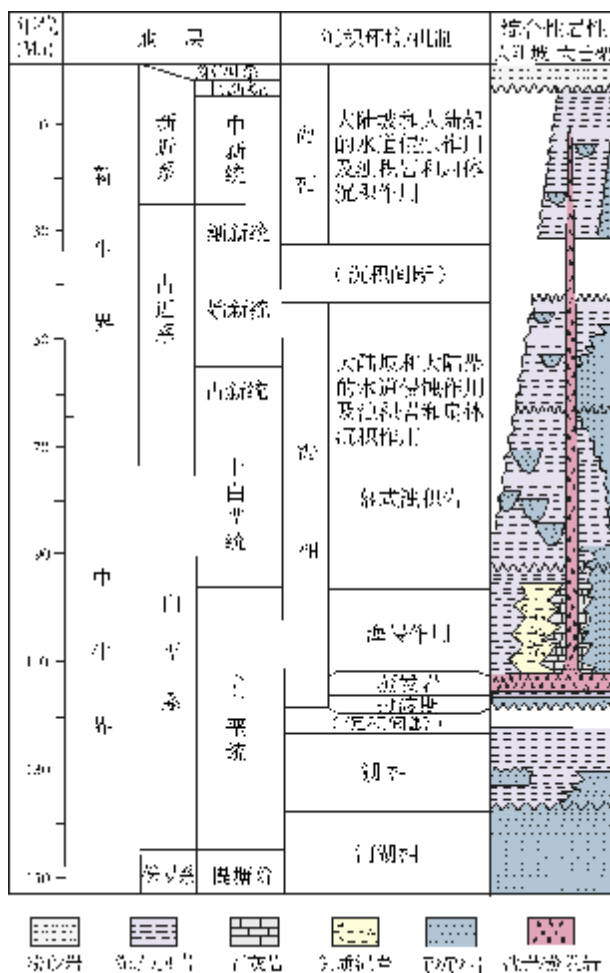


图2 下刚果盆地综合地层柱状图

沉积了一套重要的蒸发岩层序,其原始沉积厚度一般可达1000 m,受后来盐岩活动的影响,蒸发岩在平面上分布不均匀,盆地中心厚度约3000 m^[11]。

1.2 被动热沉降阶段

早白垩世阿尔布期(Albian)早期,随着洋壳的变冷,盆地开始发生沉降,盐岩顶部碎屑岩与硬石膏逐渐增多,标志着海水的盐度在减小。南大西洋的进一步加深又使得海水盐度逐渐正常化,并且为盐岩向陆坡下滑动提供了有效动力,在盆地内形成盐岩活动构造。

自晚白垩世到早渐新世,下刚果盆地以碳酸盐岩沉积为主,反映了当时低幅度、低频率的海平面变化和一种相对稳定的气候条件。早渐新世至中新世,沉积体为进积的楔状体和浊积水道(图3)。高幅度、高频率的海平面变化引起了地层的深度侵蚀与切割^[12],地震反射特征为高振幅、弱连续,反映了当时为大规模的水道环境。在中中新世,浊积水道发育达到了顶峰,浊流作用在沉积物的搬运上扮演了重要的角色。上新世早期,由于下刚果盆地海岸的抬升,在陆坡形成规模较大的刚果峡谷,该峡谷使陆源碎屑物质沿该通道直接搬运至盆底,形成进积的深水扇,而陆坡以深海、半深海泥质沉积为主,发育张性微小断距的断层。这些断层的发育具有成层性及幕式结构,形成高密集的断层层段(Highly-Faulted Interval, HFI)(图3)。

2 多边形断层特征

根据对地震剖面的观察发现,下刚果盆地多边形断层多为平缓的铲状,倾角67°~73°,断距18~27 m。根据影响范围等的差异,可将这些多边形断层划分为三个级别(表1),其中一级断层影响整个断层层段(HFI),二级断层影响2个或更多个层组,三级断层仅影响1个层组,它们在断距和倾角等要素上也存在明显的差别(表1,图4)。

表1 下刚果盆地多边形断层级别分类及特征

断层级别	断距(m)	倾角	影响范围
一级	18~27	77°~86°	整个断层层段
二级	12~18	70°~78°	2个或2个以上层组
三级	9~12	67°~73°	1个层组

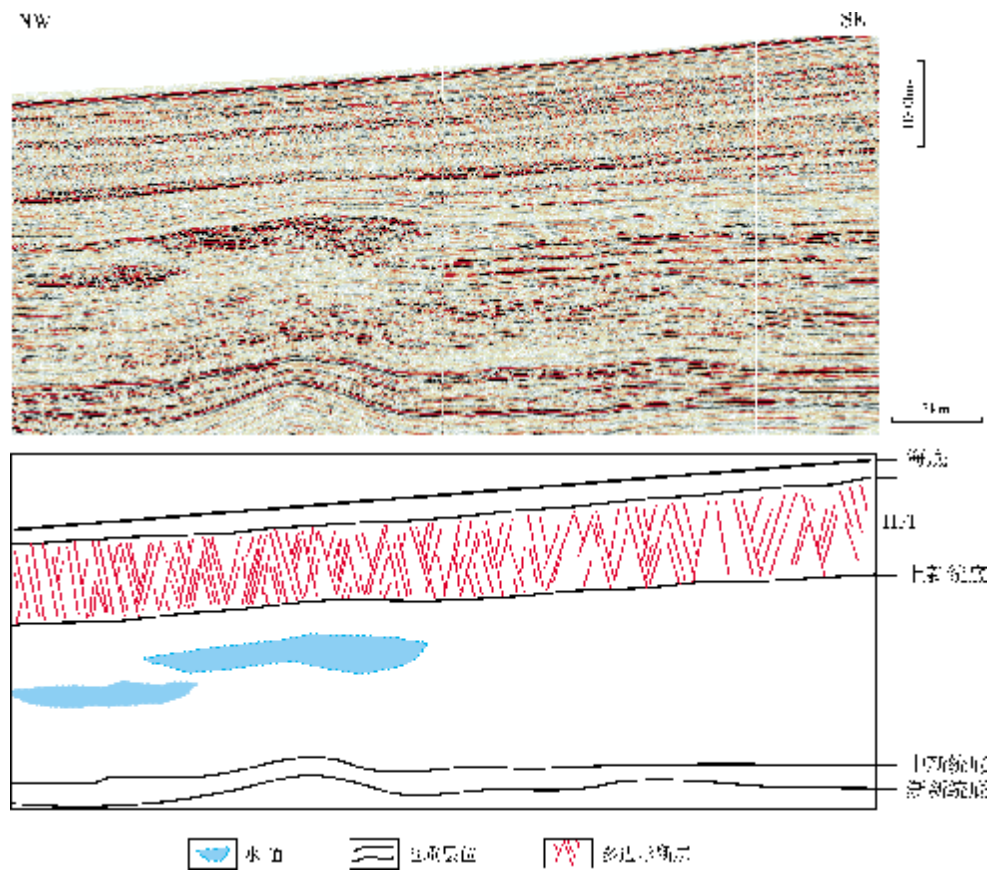


图 3 下刚果盆地地层及多边形断层发育层段剖面示意图
HFI 高密度断层层段(多边形断层发育层段),均为张性微小断距的正断层

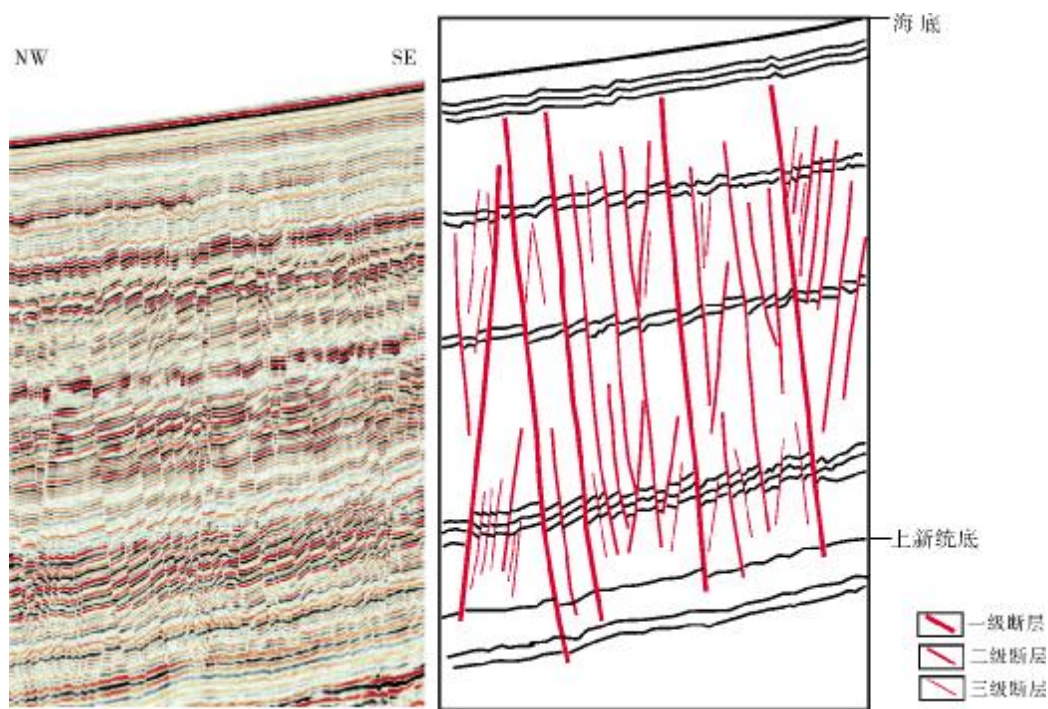


图 4 下刚果盆地多边形断层层段剖面特征

利用地震相干技术自上而下拾取不同时窗,研究多边形断层平面伸展特征发现,它们在平面上一般为线形、弧形或“之”字形。研究区内的断层没有优势走向,断层走向玫瑰花图指示这里不存在主应力方向(图5),这证明多边形断层是一种非构造成因

的断层。从图5各时窗相干切片分图来看,从分图(a)到(d),随着深度的增加,倾角减小,频率也减小,多边形断层的密度相应减小,平面分布变得比较局限,也就是说,在下刚果盆地多边形断层发育层段,断层的密度呈现上密下疏的特征。

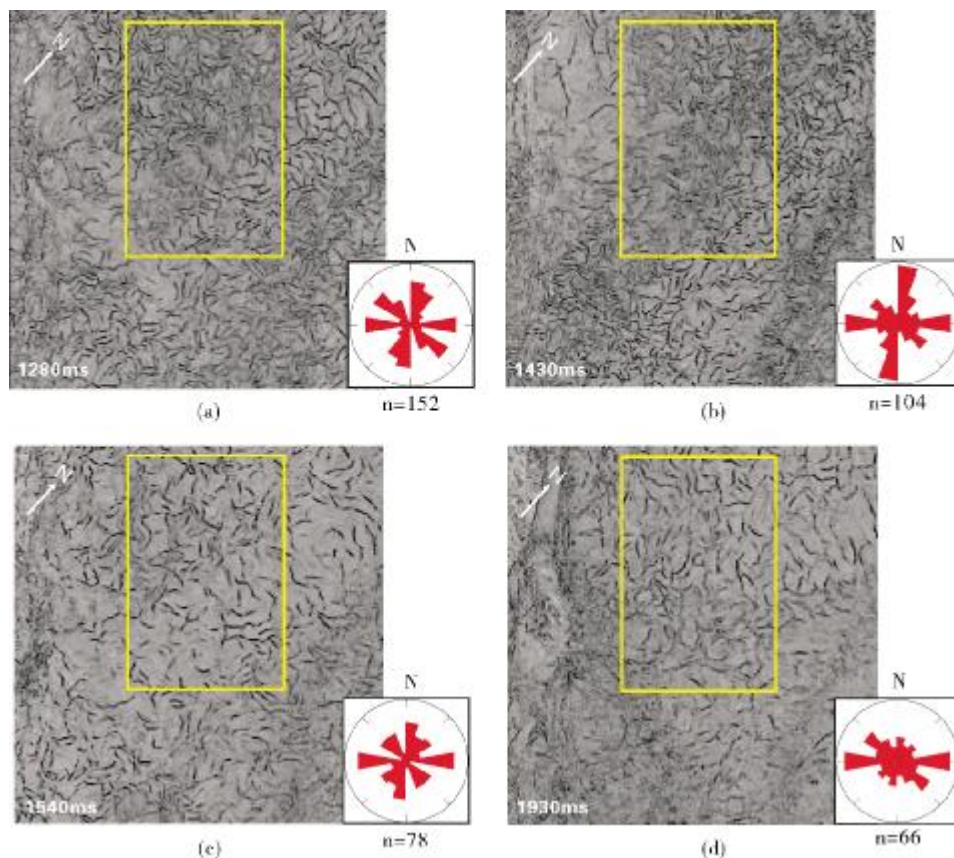


图5 下刚果盆地研究区不同时窗相干切片特征
黄色方框为计算玫瑰花图所选取的区域

3 多边形断层的形成机制

多边形断层为非构造成因,这已得到了广泛的认同,但是它在不同盆地的具体形成机制仍是众说纷纭。笔者经过广泛调研并结合下刚果盆地多边形断层特征,认为该盆地复杂的多边形断层系统从上新世至今,在以泥岩为主的层序中是与沉积物早期埋藏阶段脱水作用造成的地层超压有关。

在下刚果盆地,细粒沉积物体积收缩开始在沉积物—水体的界面进行,并且仅仅在一个方向上收缩。收缩地层之上的细粒沉积物正常压实,形成渗透率极低的致密层,阻止了下伏收缩地层的流体排泄,因此造成了欠压实状态,并在超压环境下发生

了收缩细粒沉积物的断裂。随着脱水作用的增强,断层位移量增加。这种机制诱发沉积物承受张性压力,继而导致地层层间有效压力的减小。体积收缩调节垂向压实和随后的伸展。一旦多边形断层形成,超压流体将沿着它们排出,从而在海底形成凹坑(pockmark)。随着压力的释放,断层发育强度减弱。如果再次经历超压,将引起下一阶段多边形断层的发育,并可能引发原先的多边形断层再次活动(图6)。

多边形断层体系的发育程度主要取决于沉积物的颗粒大小以及矿物成分,其中颗粒大小为主控因素。在北海盆地,岩性分析表明随着颗粒的减小和蒙脱石含量的增加,多边形断层的发育程度也会增强^[13]。

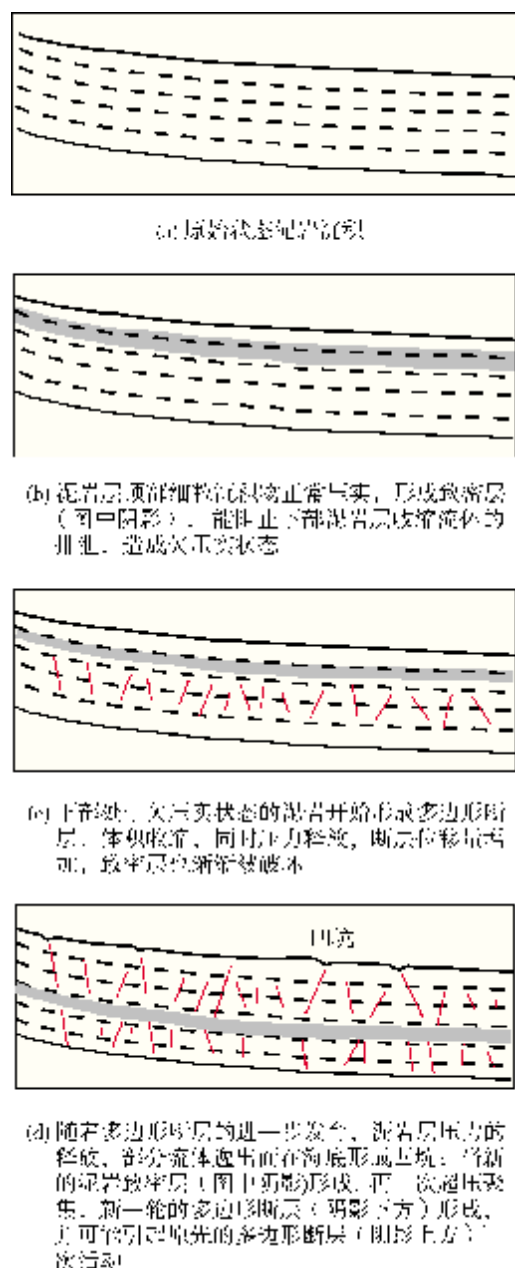


图6 下刚果盆地多边形断层形成机制示意图

4 油气意义

多边形断层的研究已经近 20 年, 长期以来其形成机制一直是争论的焦点, 但近几年关于它在油气勘探中的意义成了广泛关注的焦点^[3, 14-15]。在世界许多深水盆地, 多边形断层发育层段可以作为油气运移的通道, 使油气沿其运移到上覆浊积水道砂体内, 为油气的二次成藏提供条件, 如琼东南盆地和英国北海盆地等。同时, 多边形断层也可以为砂岩体的侵入提供通道^[16] (图 7), 大规模砂岩体的侵入及其伴

生的断裂系统, 增加了地层的连通性, 为油气运移提供了更为有效的通道, 如英国 Faroe-Shetland 盆地^[17]。

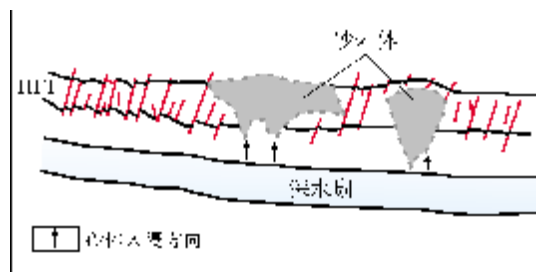


图7 多边形断层与侵入砂岩体示意图

(据文献[16], 略有修改)

HFI 高密集断层层段(多边形断层发育层段), 均为张性微小断距的正断层

下刚果盆地研究区内盐上白垩系阿尔布阶—赛诺曼阶(Cenomanion)页岩是第三系储层最主要的烃源岩, 油气沿同生断裂进入第三系水道砂岩体内, 形成岩性地层圈闭。但由于上覆多边形断层体系的存在, 先期在水道砂岩内聚集成藏的油气沿多边形断层向上运移, 在一定温度和压力条件下, 在上覆地层内形成气水化合物, 对后期的油气逸散起到遮挡作用(图 8)。

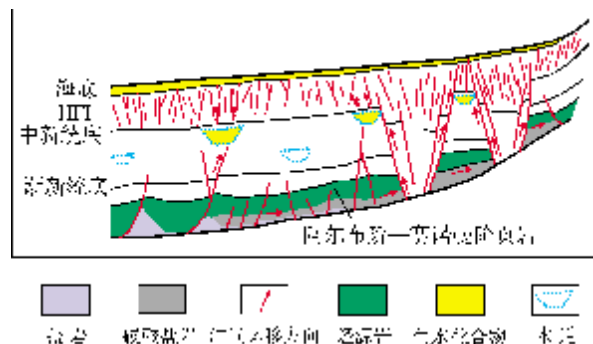


图8 下刚果盆地油气成藏模式图

HFI 高密集断层层段(多边形断层发育层段), 均为张性微小断距的正断层

多边形断层为一类非构造断层, 主要分布于深水环境下的细粒沉积物中, 为相对致密的泥质沉积, 所以其本身并没有储集性。多边形断层的发育可以指示其下伏砂岩的发育为深水环境, 同时对多边形断层系的研究也有助于对泥岩压实、油气运移、泥岩中流体活动状态以及对深水砂体分布和几何形态特征的分析。

参考文献

- [1] Cartwright J A. Episodic collapse of geopressed shale sequences in the North Sea Basin[J]. *Geology*, 1994, 22:447-450.
- [2] Cartwright J A, James D, Bolton A. The genesis of polygonal fault systems: A review[J]. *Geological Society Special Publication*, 2003, 216:223-243.
- [3] 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.
- [4] Sun Qiliang, Wu Shiguo, Yao Genshun. Characteristics and formation mechanism of polygonal faults in Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Journal of Earth Science*, 2009, 20(1):180-192.
- [5] Henriot J P, De Batist M, Verschuren M. Early fracturing of Palaeogene clays, southernmost North Sea: Relevance to mechanisms of primary hydrocarbon migration[M]// Spencer A M. *Generation, Accumulation and Production of Europe's Hydrocarbons*. Oxford: Oxford University Press, 1991:217-227.
- [6] Verschuren M. An integrated 3D approach to clay tectonic deformation[D]. Ghent: Universiteit Ghent, 1992.
- [7] Watterson J, Walsh J, Nicol A, et al. Geometry and origin of a polygonal fault system[J]. *Geological Society Journal*, 2000, 157(1): 151-162.
- [8] 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*, 2000, 8(2):183-193.
- [9] Goult N R. Mechanics of layer-bound compaction faulting in fine grained sediments[J]. *Geological Society Journal*, 2002, 159(3):239-246.
- [10] Cartwright J A. Episodic basin-wide hydrofracturing of over-pressured Early Cenozoic mudrock sequences in the North Sea Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1994, 11 (5):587-607.
- [11] 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.
- [12] Gay A, Lopez M, Cochonat P, et al. Polygonal faults-furrows system related to early stages of compaction-upper Miocene to recent sediments of the Lower Congo Basin[J]. *Basin Research*, 2004, 16(1):101-116.
- [13] 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):793-810.
- [14] 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.
- [15] 吴时国, 孙启良, 吴拓宇, 等. 琼东南盆地深水多边形断层的发现及其油气意义[J]. *石油学报*, 2009, 30(1): 22-27.
- [16] 吴时国, 孙运宝, 孙启良, 等. 深水盆地中大型侵入砂岩的地震识别及其成因机制探讨[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(6): 562-569.
- [17] Simon J S. Large-scale conical sandstone intrusions and polygonal fault systems in Tranche 6, Faroe-Shetland Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24 (3):173-188.

编辑:吴厚松

Polygonal Fault Systems and the Significance to Hydrocarbon Accumulation in the Lower Congo Basin, Africa

Li Shitao, Wang Zhenqi, Zhang Xiao, Li Tao

Abstract: Based on high-resolution 3D seismic data, a sort of polygonal fault systems has been identified in Pliocene-Pleistocene strata in Lower Congo Basin. Within the seismic sections, the polygonal fault systems are characterized by small extensional faults, which develop in pelagic or hemipelagic sedimentary environment with fine-grained mud-dominated sediments. Within the seismic-time coherent slices, polygonal shapes are identified in map view. The orientations of the polygonal faults are almost isotropic, which indicates a non-tectonic origin. In an identical highly-faulted interval, it is characterized by dense in the upper and rare in the lower. The development mechanism for the polygonal fault systems is inferred to be that due to the volumetric contraction induced by syneresis during early burial of compaction of fine sediments at the top, dense layers formed and resisted against the drainage of fluid out from undercompacting mudstone in the lower, which gradually resulted in polygonal faults. With evolution of strata, new polygonal faults could develop under previous polygonal faults and simultaneously the upper polygon faults would be active once again. The factors dominating the development of polygonal fault systems are mainly the sizes of sediment grain and the composition of minerals. With decreasing grains and increasing montmorillonite, polygon faults will develop further in the extent. Polygonal faults not only can be as pathways of hydrocarbon migration but also form overpressure that seals hydrocarbon to escape.

Key words: Polygonal fault; Fault feature; Mechanism of formation; Hydrocarbon accumulation; Lower Congo Basin
Li Shitao; male, Master student. Add: Faculty of Geoscience, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434023 China