

# 松辽盆地中部后裂谷早期正断层系形成机制

龚发雄<sup>1,2</sup>, 单业华<sup>1</sup>, 林 舸<sup>1</sup>, 李自安<sup>1</sup>, 刘士林<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要:** 在松辽盆地后裂谷早期的沉积地层里广泛发育着一个长度相对短、走向变化相对大的正断层系。大庆太平屯区块高精度三维地震勘探结果的构造研究表明, 该层伸展率可达  $0.0594 \pm 0.0209$ , 由此向上或向下发生明显的减少。这与裂谷盆地地层的伸展率自下而上一般呈单调递减是不一致的, 意味着单纯的区域拉伸不能够解释这种反常现象。笔者认为在成岩过程中沉积物可能发生的体积收缩应该是导致这种伸展率异常的主要原因。文中分析了造成体积收缩的3种可能机制: 生烃、伊利石化脱水和压实收缩, 其中最主要的是压实收缩机制。此外, 构造应力场也明显地影响着该断层系的形成, 造成断层走向分布具有一定的方向性。

**关键词:** 正断层系; 形成机制; 体积收缩; 后裂谷早期; 松辽盆地。

中图分类号: P631.4; P618.130.2

文章编号: 1000-2383(2008)04-0547-08

收稿日期: 2007-07-26

## Mechanism of Early Post-Rift Normal Faults in the Central Songliao Basin, Northeastern China

GONG Fa-xiong<sup>1,2</sup>, SHAN Ye-hua<sup>1</sup>, LIN Ge<sup>1</sup>, LI Zi-an<sup>1</sup>, LIU Shi-lin<sup>1,2</sup>

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** In the Songliao basin, a network of normal faults, characterized by relative variability in strike and short length, was widely produced in sediments accumulated during the early post rifting. Based upon 3-D high-resolution seismic data from the Taiping屯 block in the Daqing oilfield, a systematic study of faults in the block was made in this paper. Calculated extensional strain is  $0.0594 \pm 0.0209$  in these rocks, and turns markedly smaller in the above or the below layers. This is inconsistent with the generally monotonous increase of extensional strain in rift basin with buried depth, implying that the simple regional extension could not account for this abnormal phenomenon, in turn. Volumetric contraction in the process of compaction, in our opinion, is the main reason for this phenomenon. Three main possible mechanisms for such layer-parallel shortening are hydrocarbon generation, transformation from smectite to illite, and lateral compaction, among which the last is considered the most important mechanism in this case. In addition, the preferred orientation of these normal faults indicates the influence of tectonic stress, although relatively slight, on their propagation.

**Key words:** normal fault system; mechanism; volumetric contraction; early post rifting; Songliao basin.

位于中国东北的松辽盆地(图 1a)是一个重要的中—新生代陆相裂谷盆地(李娟和舒良树, 2002; Ren *et al.*, 2002; 胡望水等, 2005), 拥有极其丰富的油气资源。在该盆地早白垩世后裂谷期, 广泛发育着一套长度相对短、走向变化相对大的正断层(胡望

水, 1995; 刘德来等, 1996)。它们具有与裂谷期不同的断层走向分布特征(龚发雄等, 2006), 主要分布在上白垩统姚家组顶面反射层( $T_1$ )和下白垩统登娄库组顶面反射层( $T_3$ )之间, 一般只断开上白垩统青山口组和下白垩统泉头组地层, 少数断开上白垩统

姚家组或下白垩统登娄库组。通过大庆太平屯区块高精度三维地震勘探结果的构造研究,笔者发现杨大城子油层第Ⅲ组顶面反射层( $T_{2-3y}$ )的伸展率明显比其上反射层( $T_2$ )或其下反射层( $T_3$ )的伸展率大数倍。正常地,随着埋深减小,裂谷盆地地层的伸展率呈单调递减,反映出不同时期拉伸的累计效应。这种反常现象究竟是什么原因造成的?它与区域构造应力场之间是否有成因联系?它的存在是否影响由裂谷盆地平衡剖面分析得到的计算结果?本文将在太平屯区块实例分析的基础上,参考国内类似现象的研究,试图回答这些问题。

## 1 后裂谷期断层特征

在松辽盆地内,与裂谷期正断层相比,后裂谷期发育的正断层(胡望水,1995;刘德来等,1996;龚发雄等,2006)通常具有 100 m 的断距,断距变化在 30~100 m,大多在 30~50 m 之间;平面上的延伸长度小,从几公里到几十公里。这些断层呈 NNW 向或 NNE 向延伸(图 1f),倾角为  $45^\circ\sim 70^\circ$ ,平均  $55^\circ\sim 60^\circ$ ,平面上呈现拐角、多边形等组合型式(图 1c)。它们主要集中发育在姚家组顶面反射层( $T_1$ )和登娄库组顶面反射层( $T_3$ ),几乎遍及整个松辽盆地(梅廉夫等,1996)。

近年来出于油田生产需要,笔者先后在松辽盆地中部长垣隆起中部的太平屯区块和北高台子区块开展过高精度三维地震勘探,为系统研究后裂谷期

这套断层系提供了便利条件。本文主要根据太平屯区块高精度三维地震解释资料,重点研究区内 5 个地震反射层如上白垩统姚家组顶面( $T_1$ )、下白垩统泉头组顶面( $T_2$ )、下白垩统杨大城子油层第Ⅲ组顶面( $T_{2-3y}$ )、下白垩统登娄库组顶面( $T_3$ )和上侏罗统基底顶面( $T_5$ )的断层系特征,其中  $T_3\sim T_5$  反射层属于裂谷期的范围。受地震勘探精度的限制,识别出来的断层断距一般不小于 8 m。

在太平屯区块,无论是裂谷期断层还是后裂谷期断层,它们的数量随着断层长度增大而趋向减小,大部分的断层长度不超过 2.5 km(图 2),尤其是后裂谷期断层。有意思的是,裂谷期(如  $T_4$  反射层)断层具有微弱的双峰式分布特征,即两头多,中间少(图 2e)。这种分布特征显得有些异常,因为这与由正常断层成核、扩展和连接导致的断层长度幂率分布(Wojtal, 1994; Yielding *et al.*, 1996)不太一致。

在断层数量上, $T_2$  反射层的断层明显比  $T_1$  或  $T_3$  反射层的断层多(图 1b-1d 和图 2)。这些断层表现出同沉积的活动特征,即造成两盘同一地层厚度的差异。后裂谷期断层的断距普遍在  $T_{2-3y}$  反射层达到最大,向下到  $T_3$  反射层或向上到  $T_2$  反射层均变小。然而,即便在  $T_{2-3y}$  反射层,最大断距也只有 40 m 左右,相对裂谷期断层的几百米断距而言是很小的。

断层走向统计结果(图 1e-1g; 龚发雄等, 2006)表明,断层走向在  $T_5$  和  $T_4$  反射层主要是以 NNE 为主,少量呈 NNW 走向;向上到  $T_3$  反射层

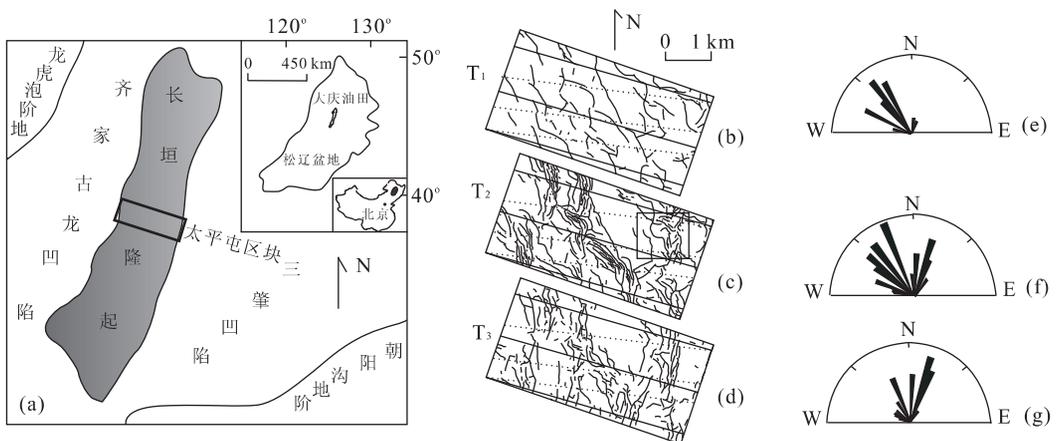


图 1 研究区的位置(a);  $T_1$ 、 $T_2$ 、和  $T_3$  反射层断层迹线图(b, c, d); 走向玫瑰花图(e, f, g)

Fig. 1 Location of the study area (a), and fault trace maps (b, c, d) and their rosettes (e, f, g) in seismic reflection layers  $T_1$ ,  $T_2$ , and  $T_3$

断层迹线图图中的实线和虚线分别代表着 NW-SE(实线)和 E-W(虚线)2 个方向上的伸展量测量线

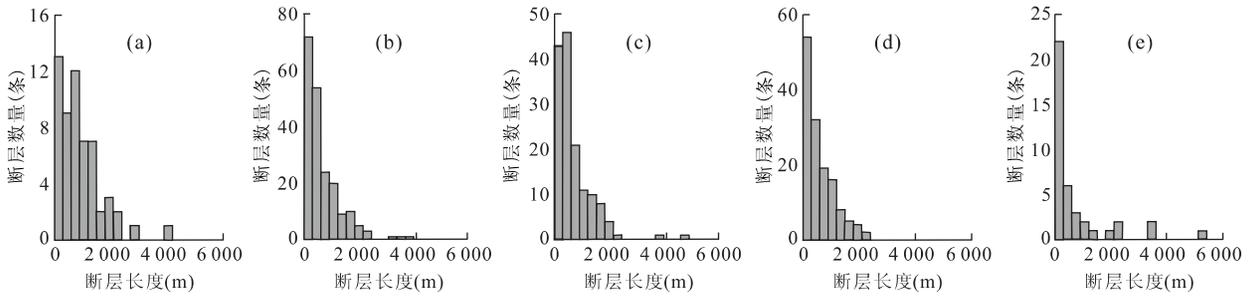


图 2 太平屯区块  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_{2-3y}$ 、 $T_3$  和  $T_4$  反射层的断层长度频率图

Fig. 2 Fault length frequency diagrams in the seismic reflection layers  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_{2-3y}$ ,  $T_3$  and  $T_4$  in Taipingtun block

表 1 研究区不同反射层不同测线(图 1b—1d)上获得的伸展率

Table 1 Extensional strain measured along the scan lines (see Fig. 1b—1d) in the seismic reflection layers in the study area

反射层位		$T_1$	$T_2$	$T_{2-3y}$	$T_3$	$T_5$	
伸 展 率	北西向测线	测线 1	0.013 9	0.031 9	0.051 4	0.014 2	0.126 3
		测线 2	0.006 9	0.061 0	0.076 5	0.016 9	0.153 9
		测线 3	0.007 8	0.054 9	0.050 3	0.014 4	0.147 4
		平均值	0.009 5	0.049 3	0.059 4	0.015 2	0.142 5
		均方差	0.005 4	0.021 7	0.020 9	0.002 1	0.020 3
	东西向测线	测线 4	0.008 1	0.054 0	0.064 1	0.010 9	0.184 8
		测线 5	0.010 4	0.058 1	0.083 8	0.013 9	0.178 1
		测线 6	0.009 9	0.066 1	0.057 4	0.018 5	0.169 4
		平均值	0.009 5	0.059 4	0.068 4	0.014 4	0.177 4
		均方差	0.001 7	0.008 7	0.019 4	0.005 4	0.010 9

时开始有明显的变化,NNW 走向断层增加;再向上到  $T_2$  反射层时,这种变化更加明显,出现以 NNW 走向为主、走向变化较宽的断层,并伴随以 NNE 向为主的次级断层发育;到  $T_1$  反射层时,断裂变成主要以 NW-NNW 向为主,平面上呈雁列式排列;到  $T_{06}$  反射层时,断层走向以 NWW 向为主。

关于松辽盆地后裂谷期断层的形成,胡望水等(1995)和刘德来等(1996)都认为当时存在着—期微弱的区域伸展作用,与此相伴的有角度不整合和同期火山喷发作用。火山喷发这一证据能说明区域上处在伸展环境下,但是后裂谷期突然出现数量如此多的小断裂系统让人费解。梅廉夫等(1996)根据目前盆地内  $T_1$  和  $T_3$  反射层之间广泛存在的异常压力,认为它们是由异常流体压力作用导致的水力裂缝进一步发展而来的天然水力断层。后裂谷早期确实沉积了一套厚的泥岩,很可能盆地的快速沉降造成了超压而形成水力裂缝,但在断层形成的地质历史时期是否存在过异常流体压力,这还有待去证实,并且这一观点虽然能很好地解释断层数量的突然增加,但是解释伸展率变化情况还是有一定的难度。

## 2 伸展应变

众所周知,有关裂谷盆地的宏观变形机制,正断层是容纳区域拉伸的最重要机制,而岩层的弯曲变形却是微不足道的。松辽盆地最主要的构造反转发生在白垩纪末(李娟和舒良树,2002;胡望水等,2005),在东部表现最为强烈,形成一些逆断层和纵弯褶皱,但在中部导致长垣隆起的抬升,基本上没有改造其内部的正断层。因此,通过断层水平位移分析,我们能够较准确地估计出盆地中部的伸展量和伸展应变。

对于某一条测线,伸展应变或伸展率( $\epsilon$ )定义为:

$$\epsilon = \frac{H}{L} = \frac{\sum h_i \sin\theta_i}{L} \quad (1)$$

式(1)中: $h_i$  是测线上第  $i$  条断层的水平位移; $\theta_i$  是该条断层与测线的交角; $H$  是测线长度范围内的伸展量; $L$  是测线长度。

表 1 和图 3 是太平屯区块 5 个反射层 2 个方向(NW-SE 和 E-W)上不同测线获得的伸展应变。伸展应变在裂谷早期达到最大,平均为 0.142 5~0.177 4,到后裂谷期急剧减小,基本上只相当于裂

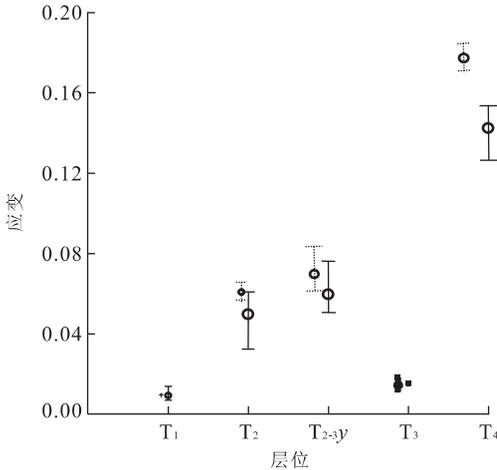


图 3 NW-SE(实线)和 E-W(虚线)2 个方向上不同反射层位的实测应变范围及平均值

Fig. 3 The range of extensional strain and its average value measured in NW-SE and E-W directed scan lines in the different layers

谷期的  $1/7$ 。后裂谷早期  $T_{2-3y}$  和  $T_2$  反射层的伸展应变为  $0.0493 \sim 0.0684$ , 比裂谷晚期  $T_3$  反射层的应变高数倍。这一现象极为反常! 在正常情况下, 裂谷盆地地层的伸展率随着埋深变小呈单调递减, 因为平行或接近平行的后续拉伸会叠加在早期的拉伸之上。

### 3 讨论

上述的  $T_2$  和  $T_{2-3y}$  反射层的伸展率增大和断层数量增多以及裂谷期断层长度的双峰分布型式, 这些异常现象都不是孤立出现, 很可能反映出共同受控于某一种构造或非构造机制。正如前所述, 单纯的区域拉伸只能说明后裂谷期正断层系的某些表象特征, 根本无法解释这些异常现象。就此而言, 笔者认为应该存在着某种非构造的形成机制, 例如重力滑动(Higgs and McClay, 1996; Dewhurst *et al.*, 1999)、压实过程中收缩(Cartwright and Lonergan, 1996; Cartwright and Dewhurst, 1998)等。考虑到重力滑动造成的断层系统有着受限的走向分布和朝向高处的一致倾向, 而研究区处于长垣隆起顶部, 内部断层倾向不一致, 所以可以排除重力滑动机制。

Cartwright and Lonergan(1996)认为在压实过程中岩石体积会发生收缩, 以此来解释北海盆地厚层泥岩中出现的、没有方向性的正断层系(Cart-

wright, 1994a, 1994b; Cartwright and Lonergan, 1997)(图 4, Watterson, 2000)。这种模型(图 5)可以比较好地解释研究区上述的伸展率增大和断层数量增多现象。事实上, 松辽盆地后裂谷早期湖相环境与北海盆地形成那套断层的深海相环境虽然不同, 但是都沉积了巨厚的泥岩和油页岩, 具有形成同类断层所需的相同或相似物质基础。

#### 3.1 压实收缩机制

在盆地沉降和压实过程中, 泥岩体积要发生收缩, 这可以由生烃、蒙脱石伊利石化和压实收缩 3 种主要机制独立或共同造成。

**3.1.1 生烃机制** 随着不断深埋, 岩石被加热, 岩石中的有机质发生裂解形成油气, 油气运移后必然导致岩石体积的变小。在研究区, 后裂谷早期青山口组下部的生油岩要在嫩江组沉积末期才进入生油门限(迟元林等, 2000), 明显要晚于同沉积断层的形成时间。当然, 生烃造成的超压有利于先存断层的再活动, 会造成断层的“幕式”活动。

**3.1.2 伊利石化脱水机制** 热力学计算已证实伊利石化脱水会造成岩石的体积变小(Mark and Richard, 1997; 陆现彩等, 2004)。蒙脱石到伊利石的转变温度大约为  $70 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ (Bruce, 1984)。松辽盆地白垩纪末的古地温梯度可达  $4.26 \sim 4.8 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ (任战利等, 2001), 按照此地温梯度推算, 要达到蒙脱石相变的最低温度( $70 \text{ }^\circ\text{C}$ )的埋藏深度应该在  $1400 \text{ m}$ 。这虽然小于  $T_{2-3y}$  反射层位的现今埋深( $1800 \text{ m}$ 左右), 但是与断层同沉积活动不相符。另外, 迟元林等(2000)的研究表明松辽盆地粘土矿

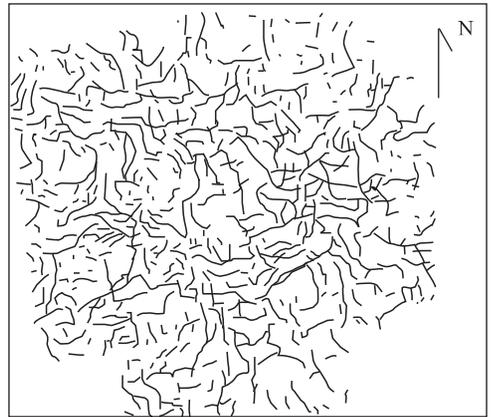


图 4 Mackunda 地区多边形断层系迹线图(Watterson, 2000)

Fig. 4 The traces of polygonal faults in the Mackunda zone (Watterson, 2000)

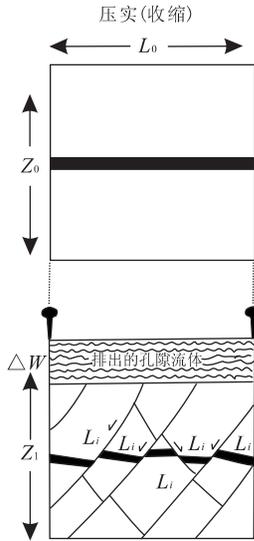


图 5 Cartwright and Lonergan(1996)的压实收缩模型

Fig. 5 A model of volumetric contraction proposed by Cartwright and Lonergan (1996)

在该模型中岩层两侧被固定,变形层被限定在垂向上变化.在这种情况下,正断层发育的唯一的途径是原始的层长在压实过程中收缩,层长的收缩平衡了因断层形成而产生的伸展应变

物脱水发生在 1 200~1 500 m 的埋深范围.

**3.1.3 压实收缩机制** 排除掉生烃和伊利石化脱水 2 种机制后,造成研究区地层体积收缩的最可能原因就是压实收缩.根据北海盆地厚层泥岩里发育的断层系现为强烈的各向同性应变, Cartwright and Lonergan(1996)认为在泥岩压实过程中地层厚度和地层长度会同时收缩,这是一种三维压实,而不是传统由重力驱动造成的一维压实.在体积收缩模型(图 5)中,如果没有引张力作用(相当于图 5 的两端被固定),地层表现出“伸展”的唯一方法就是沿地层方向的收缩被同时形成的正断层所调节.与北海盆地这套杂乱无章的正断层系不同的是,研究区后裂谷早期正断层系具有较好的方向性,应说明当时存在着较为强烈的区域构造应力作用.

**3.2 压实收缩的可能范围**

在  $T_{2-3y}$  反射层的现今埋深(约 1 800 m)和实测应变量(表 1)的约束下,笔者希望由孔隙度经验方程估计出研究区地层压实收缩的可能范围.这里定义压缩比参数( $K$ )为地层横向收缩量与纵向收缩量的比值,用于表征地层压实收缩的大小.岩石空隙度随埋深加大呈指数递减(杨桥和漆家福,2003),参考松辽盆地孔深关系得到的方程如下:

$$\phi_m = 0.644e^{-0.0004z} \quad (2)$$

根据地层骨架厚度不变的原理,首先由上式计算不同埋深上地层恢复厚度,然后在给定不同的压缩比下,计算不同埋深上该地层单位长度的横向收缩量,即横向收缩率(图 6).在不考虑区域拉伸的情形下,地层横向收缩率等价于由公式(1)定义的伸展应变.于是,在此基础上可以由已知的埋深和应变估计地层压实收缩的可能范围.

图 6 中,地层横向压缩率的变化量随着压缩比加大而变大.也就是说,要达到同样的压缩率,压缩比越大,所需要的埋深就越小.对于后裂谷期  $T_{2-3y}$  反射层, NW 向测线上获得的最大伸展率是 0.076 5,与其对应的压缩比必须大于 0.13 左右.如果考虑到区域拉伸,地层横向收缩率要降低,那么需要的压缩比下限也要降低.

**3.3 区域构造应力作用**

研究区后裂谷期发育的正断层系尽管具有变化多样的走向,这种断层走向趋势与裂谷期 NNE 向的走向趋势迥然不同,并且后裂谷期断层走向逐渐向 NW 偏转.在松辽盆地大部分地区都可以观察到这种现象. Maruyama *et al.* (1997)认为,中侏罗世(距今 180 Ma)时,东亚大陆东部的伊泽纳崎(Izanagi)板块是以非常缓慢的低速(4.7 cm/a)正向俯冲于东亚大陆之下;到早白垩世初期(距今 140 Ma),可能由于太平洋超级地幔柱的活动,伊泽纳崎板块突然改变了运动方向和速度,以 30 cm/a 的高速向正北斜向俯冲于东亚大陆之下(俯冲带走向 NE);到早白垩世中期(距今 120 Ma),伊泽纳崎板块改变

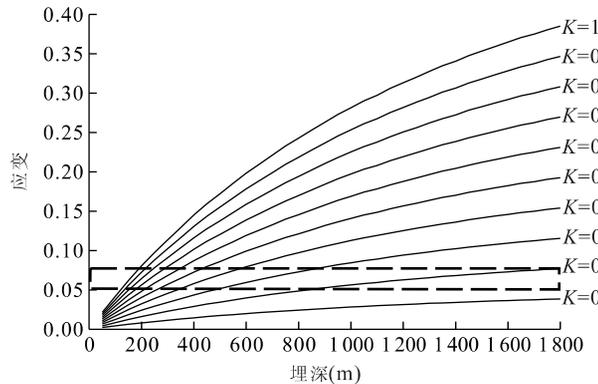


图 6 不同压缩比下泥岩横向收缩率与埋深的关系

Fig. 6 Relationship between lateral shortening ratio and burial depth for variable ratio of horizontal to vertical shortening in contraction

虚线框是  $T_{2-3y}$  反射层的现今埋深和应变测量值的约束范围

为斜向俯冲,速率为 20.7 cm/a;到 90 Ma 时伊泽纳崎板块高速、直交地俯冲到亚洲大陆下.这种亚洲东部陆缘俯冲带的某种系统性动力变化导致了区域构造应力场的重大调整(龚发雄等,2006).另根据古地磁数据,Engebretson *et al.* (1985)认为古大洋朝东亚陆缘俯冲的方向是不断变化的,180~145 Ma 时朝 N-NNW 向,145~85 Ma 时变成朝 NW 向,85 Ma 后才转成朝向正西.这一俯冲方向随时间的变化规律与松辽盆地断层走向的变化特征基本上是吻合的,正是太平洋俯冲板块的俯冲方向发生调整,造成了后裂谷期断层走向的变化和逐渐向北西偏的结果.太平洋板块俯冲这一活动也得到地震层析成像的证实,发现欧亚大陆东缘之下的地幔中存在古太平洋俯冲洋壳,它的地球物理显示是连续无间断的,表明西太平洋的俯冲是连续的过程(Van Der Voo *et al.*, 1999).

从不同反射层的测量应变值(表 1)上看,  $T_{2-3y}$  反射层的应变值要比裂谷晚期  $T_3$  反射层的应变值高数倍.如果将  $T_3$  反射层的应变值作为  $T_{2-3y}$  反射层上构造应变的上限,那么通过简单计算,我们可以知道在后裂谷早期正断层系的形成上,构造拉伸的贡献不超过 26%,而压实收缩的贡献不低于 74%.

### 3.4 对平衡剖面分析的影响

体积收缩模型(Cartwright and Lonergan, 1996)对裂谷盆地平衡剖面分析提出挑战,因为断层记录到的应变也不全是区域变形,水平方向上的地层长度不再保持不变.如果对平衡剖面分析结果做特别处理,那么可能会得出难于理解甚至荒唐的认识.例如,通过对研究区平衡剖面的分析,必然会得出在裂谷后期( $T_3$  反射层的形成时期)发生过一次构造反转的认识,然而得不到区域和局部地质资料的支持.颜丹平等(2003)计算出松辽盆地南部青山口沉积时期的伸展率为  $-0.636 \text{ m}/17\,563.000 \text{ m}$ ,于是认为青山口沉积是由构造反转造成的.就此而言,对单纯由平衡剖面分析确定的构造反转事件必须进行认真甄别,常规的地质分析仍然是不可缺少的手段.

## 4 结论和问题

在松辽盆地后裂谷早期的沉积地层里广泛发育着一个长度相对短、走向变化相对大的正断层系.通

过盆地中部太平屯区块高精度三维地震勘探结果的构造研究,发现由正断层造成的伸展应变在后裂谷早期,  $T_{2-3y}$  反射层为  $0.0594 \pm 0.0209$ ,比在上面  $T_1$  反射层或在下面的裂谷晚期  $T_3$  反射层高若干倍.正常情况下,与裂谷盆地地层的伸展率自下而上呈单调递减,意味这种反常现象是不能够用单纯区域拉伸来解释的.与此有关的异常现象有在  $T_2$  和  $T_{2-3y}$  反射层上断层数量的增多和裂谷期断层长度的双峰分布型式.

这套断层具有与 Cartwright and Lonergan (1996)在北海盆地厚层泥岩中看到的正断层系(图 4)非常相似的特征,即短小、走向变化、层控、异常高的伸展应变等.不同的是,北海盆地正断层系显得杂乱无章,而研究区后裂谷早期正断层系具有较好的方向性,意味着后者在当时存在着较为强烈的区域构造应力作用.

后裂谷早期伸展应变的异常增大可以由生烃、蒙脱石伊利石化和压实收缩 3 种非构造机制单独或共同形成,其中对于研究区最有可能的就是压实收缩.在不考虑构造伸展的条件下,所需要的地层横向收缩与纵向收缩之比值不低于 0.13.在后裂谷早期正断层系的形成上,压实收缩的贡献不低于 74%,而构造拉伸的贡献不超过 26%.

当存在着压实收缩的地层时,必须对平衡剖面分析的结果做特别处理,否则可能会得出难于理解甚至荒唐的认识.这要求我们认真甄别单纯由平衡剖面分析确定的构造反转事件.尽管如此,目前对压实收缩机制的认识基本上还处于概念模型的层面上,只有发生明显压实收缩的地层,才能够被识别出来.

致谢:本文研究得到中国科学院“百人计划”启动项目(KZCX0543081001)和国家自然科学基金面上项目(40672144)的资助,特此致谢.

## References

- Bruce, C. H., 1984. Smectite dehydration-its relation to structural development and hydrocarbon accumulation in northern Gulf of Mexico Basin. *AAPG Bulletin*, 68: 673-683.
- Cartwright, J. A., 1994a. Episodic basin-wide fluid expulsion from geopressured shale sequences in the North Sea basin. *Geology*, 22(5): 447-450.
- Cartwright, J. A., 1994b. Episodic basin-wide hydrofracturing of overpressured Early Cenozoic mudrock sequences

- in the North Sea basin. *Marine and Petroleum Geology*, 11(5):587—607.
- Cartwright, J. A., Dewhurst, D. N., 1998. Layer-bound compaction faults in fine-grained sediments. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 110(10):1242—1257.
- Cartwright, J. A., Lonergan, L., 1996. Volumetric contraction during the compaction of mudrocks: A mechanism for the development of regional-scale polygonal fault systems. *Basin Research*, 8(2):183—193.
- Cartwright, J. A., Lonergan, L., 1997. Seismic expression of layer-bound fault systems of the Eromanga and North Sea basins. *Expl. Geophys.*, 28(3):323—331.
- Chi, Y. L., Xiao, D. M., Yin, J. Y., 2000. The injection pattern of oil and gas migration and accumulation in the Sanzhao area of Songliao basin. *Acta Geologica Sinica*, 74(4):371—377 (in Chinese with English abstract).
- Dewhurst, D. N., Cartwright, J. A., Lonergan, L., 1999. The development of polygonal fault systems by syneresis of colloidal sediments. *Marine and Petroleum Geology*, 16(8):793—810.
- Engelbreton, D. C., Cox, A., Gordon, R. G., 1985. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin. *The Geological Society of America Special Paper*, 206:1—59.
- Gong, F. X., Shan, Y. H., Lin, G., et al., 2006. Fault strike and its significance of plate dynamics in central placanticline, Songliao basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 27(6):687—690 (in Chinese with English abstract).
- Higgs, W. C., McClay, K. R., 1996. Analogue sandbox modeling of Miocene extensional faulting in the outer Moray Firth. In: Tectonics and seismic sequence stratigraphy. *Geological Society, London, Special Publications*, 71:141—162.
- Hu, W. S., 1995. “T<sub>2</sub>” faults system and early Qingshankou stretched rifting in Songliao basin. *Petroleum Exploration and Development*, 22(2):8—12 (in Chinese with English abstract).
- Hu, W. S., Lü, B. Q., Zhang, W. J., et al., 2005. An approach to tectonic evolution and dynamics of the Songliao basin. *Chinese Journal of Geology*, 40(1):16—31 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Shu, L. S., 2002. Mesozoic-Cenozoic tectonic features and evolution of the Songliao basin, NE China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 38(4):525—531 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. L., Chen, F. J., Wen, X. Q., 1996. Analysis on the origin of T<sub>2</sub> post-rift formations in Songliao basin. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 20(1):23—27 (in Chinese with English abstract).
- Lu, X. C., Liu, Q., Zhang, L. Y., 2004. Evaluation of contribution of illitization of smectite to the geopressure in oil-bearing basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(4):285—291 (in Chinese with English abstract).
- Mark, J. O., Richard, E. S., 1997. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: A reevaluation. *AAPG Bulletin*, 81(6):1023—1041.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G., et al., 1997. Paleogeographic maps of the Japanese islands; Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, 6:121—142.
- Mei, L. F., Fei, Q., Xu, S. H., 1996. The natural hydrofracture systems of T<sub>2</sub> faults in Songliao basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 21(6):632 (in Chinese).
- Ren, J., Tamaki, K., Li, S., et al., 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344(3—4):175—205.
- Ren, Z. L., Xiao, D. M., Chi, Y. L., 2001. Restoration of the palaeo-therm in Songliao basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 20(1):13—14 (in Chinese with English abstract).
- Van Der Voo, R., Spakman, W., Bijwaard, H., 1999. Mesozoic subducted slabs under Siberia. *Nature*, 397(21):246—249.
- Watterson, J., 2000. Geometry and origin of a polygonal fault system. *Journal of the Geological Society*, 157(1):151—162.
- Wojtal, S. F., 1994. Fault scaling laws and the temporal evolution of fault systems. *Journal of Structural Geology*, 16(4):603—612.
- Yan, D. P., Tian, C. L., Meng, L. B., et al., 2003. Balanced geological section for extensional tectonic basin and its implication: An example from southern Songliao basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(3):275—280 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Q., Qi, J. F., 2003. Method of delaminated decompaction correction. *Petroleum Geology & Experiment*, 25(2):206—210 (in Chinese with English abstract).
- Yielding, G., Needham, T., Jones, H., 1996. Sampling of fault populations using sub-surface data: A review. *Journal of Structural Geology*, 18(2/3):135—146.

附中文参考文献

迟元林, 萧德铭, 殷进垠, 2000. 松辽盆地三肇地区上生下储“注入式”成藏机制. 地质学报, 74(4): 371—377.

龚发雄, 单业华, 林舸, 等, 2006. 松辽盆地长垣中部断层走向及板块动力学意义. 新疆石油地质, 27(6): 687—690.

胡望水, 1995. 松辽盆地“T<sub>2</sub>”断层系及青山口早期伸展裂陷. 石油勘探与开发, 22(2): 8—12.

胡望水, 吕炳全, 张文军, 等, 2005. 松辽盆地构造演化及成盆动力学探讨. 地质科学, 40(1): 16—31.

李娟, 舒良树, 2002. 松辽盆地中、新生代构造特征及其演化. 南京大学学报(自然科学), 38(4): 525—531.

刘德来, 陈发景, 温详泉, 1996. 松辽盆地坳陷期 T<sub>2</sub> 断层成因机制分析. 大庆石油学院学报, 20(1): 23—27.

陆现彩, 刘庆, 张林晔, 2004. 蒙脱石伊利石化对含油气盆地地层压力影响的定量研究. 矿物岩石地球化学通报, 23(4): 285—291.

梅廉夫, 费琪, 徐思煌, 1996. 松辽盆地“T<sub>2</sub>”天然水力断裂系统. 地球科学——中国地质大学学报, 21(6): 632.

任战利, 萧德铭, 迟元林, 2001. 松辽盆地古地温恢复. 大庆石油地质与开发, 20(1): 13—14.

颜丹平, 田崇鲁, 孟令波, 等, 2003. 伸展构造盆地的平衡剖面及其构造意义. 地球科学——中国地质大学学报, 28(3): 275—280.

杨桥, 漆家福, 2003. 碎屑岩层的分层去压实校正方法. 石油实验地质, 25(2): 206—210.

\*\*\*\*\*

### 热烈祝贺《地球科学》(英文版)进入国际著名检索系统 SCIE

根据美国汤姆森科技信息集团科学信息研究所(Thomson ISI)的正式通知和 ISI 网查询,《地球科学》(英文版)(Journal of China University of Geosciences, ISSN:1002—0705)已经被列入美国《科学引文索引(扩展库)》(SCIE)来源期刊,2007 年第 18 卷第 1 期开始正式收录。

《地球科学》(英文版)创刊于 1990 年,十几年来,在中国地质大学校领导的大力支持下,学报编辑部坚持按照国际期刊规范办刊,坚定不移地走国际化、专业化的道路,报道中国地球科学领域前瞻性的研究成果和最新发现,该刊的学术质量稳步上升。

尤其是 1999 年以来,《地球科学》编辑部确立了进入 SCI 的奋斗目标,为了提高期刊质量,严格按照 SCI 选刊、评估标准办刊,并且采取了一系列措施:2003 年改革了编委会,增加了 17 名国际编委,2004—2006 年聘请了英国语言学博士 Paul Richard Weldon 来编辑部工作,2005 年 9 月与国际著名出版公司 ELSEVIER 签订了合作出版、发行英文版电子版的协议;2006 年起由国际著名出版集团 ELSEVIER 独家海外发行英文版电子版,扩大了英文版的国际知名度.2007 年 6 月 28 日期盼已久的美国汤姆森公司发来喜讯:《地球科学》(英文版)2007 年起正式被 SCIE 收录。

八年来,《地球科学》编辑部在中国地质大学校领导和编委会的正确领导下,主编王亨君教授率领的《地球科学》团队求真务实,开拓创新,在选题策划、编辑人才培养、网站建设和国际化发展等方面付出了艰辛的努力,取得了一次又一次的成绩,为繁荣科技出版和地球科学事业做出了应有贡献。

今后《地球科学》编辑部将要承担着更大的压力和挑战,要不断与时俱进,开拓创新,为争创国际一流科技期刊而努力奋斗。