地学前缘
EARTH SCIENCE FRONTIERS

松辽盆地徐家围子断陷边界断裂生长过程的定量分析

张军龙[1]， 蒙启安[2]， 张长厚[3]， 高战武[1]

1. 中国地震局 地震预测研究所，北京 100036
2. 大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院，黑龙江 大庆 163712
3. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院，北京 100083

Zhang Junlong[1]， Meng Qi'an[2]， Zhang Changhou[3]， Gao Zhanwu[1]

1. *Insititute of Earthquake Science*, *China Earthquake Administration*, *Beijing* 100036, *China*
2. *Research Institute of Exploration and Development*, *Daqing Oilfield Company Ltd.*, *PetroChina*, *Daqing* 163712, *China*
3. *School of Earth Sciences and Resources*, *China University of Geosciences(Beijing)*, *Beijing* 100083, *China*

Zhang Junlong, Meng Qi'an, Zhang Changhou, et al. A quantitative study on the growth of boundary faults of the Xujiaweizi faulting depression in the Songliao Basin. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(4): 087-096

Abstract: The Xujiaweizi faulting depression lies in the central part of the Songliao Basin. It is controlled by Songxi and Xuxi faults. Based on the geologic interpretations of the seismic reflection data, we have investigated the growth rate and the evolution of the master faults forming basin boundaries by applying the method of analyzing the relationship of displacement-length along strike of normal faults and the approaches for analyzing growth rate along dip direction. It is revealed that the faults formed mainly in the Shahezi Period. The average growth rate of fault is estimated to be 35 m/Ma and 71 m/Ma for Xuxi and Songxi respectively and larger than 60 m/Ma for the boundary fault system as a whole. During the Shahezi Period, Songxi and Xuxi faults were developed independently with a little soft link around their overlapping part. The Yingcheng Period was another important stage with much more intensive activities of Songxi fault, leading to a larger and deeper faulting depression with thicker sediments infilling. The average growth rate of fault was 18 m/Ma for Xuxi, and 85 m/Ma for Songxi. Hard link occurred between them. Only weak and local faulting activity occurred around some linking areas after the Yingcheng Period. The oil and gas fields are mainly located in the areas where secondary tectonic element developed. This finding bears important implications for the further oil and gas exploration in Xujiaweizi Area.

Key words: Xujiaweizi faulting depression; fault linkage; growth rate; quantitative; development

摘　要:徐家围子断陷位于松辽盆地中部,受徐西和宋西两条边界断裂控制。基于地震反射剖面地质解译成果,应用断层沿走向位移-长度曲线形态分析方法和沿倾向生长速率分析方法,对两条断裂的生长演化过程进行了初步的研究。结果表明,沙河子期(136～144 Ma)为最主要的生长期,徐西断层的平均生长速率为 35 m/Ma, 宋西断层的平均生长速率为 71 m/Ma,断陷边界断裂总体平均生长速率大于 60 m/Ma,两条断层主要呈现独立生长状态,只在重叠的部位发生微弱的软连接;营城期(126～136 Ma)也是主要的生长期,徐西断层的

收稿日期:2009-03-11;**修回日期**:2009-05-21
基金项目:国家自然科学基金项目(40672150);国家科技支撑项目(2006BACBB01-0203);地震科学联合基金课题"华北克拉通东北部地震构造动力环境研究";地震预测研究所基本科研业务专项(02076902-07)
作者简介:张军龙(1973—),男,博士研究生,副研究员,构造地质学专业,主要从事构造和地震构造研究。E-mail: zhjulo_2002@163.com

平均生长速率为 18 m/Ma,宋西断层的平均生长速率为 85 m/Ma,二者发生硬连接,并基本结束了硬连接过程,以重叠处宋西断层的强烈活动为特征,断陷盆地的规模逐渐扩大,沉积厚度随之增加;营城期后断层只在局部连接地点发生微弱活动。断层生长过程中伴生构造的位置基本与油气田的分布相吻合,对它的深入研究将有助于油气勘探。

关键词:徐家围子断陷;断裂连接;生长速率;定量;演化

中图分类号:P542.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-2321(2009)04-0087-10

近年来,随着中、浅层油气资源的不断开采和勘探技术的不断提高,油气勘探目标逐渐向深层扩展[1-2]。目前,在徐家围子断陷及周边已经陆续发现了汪家屯、宋芳屯、昌德、农安村、庆深等气田[3]。它们的空间分布与徐家围子断陷之间的关系仍然是需要进行深入解析的一个重要问题。前人研究表明,徐家围子经历了盆地断陷期和拗陷期,前期火山活动频繁,后期挤压、反转构造发育,地层经历了多期热事件和多期剥蚀事件[4-6],演化过程复杂,制约着对两者之间关系的认识。因此,基于深层构造变形的精细分析,构建盆地格架,有助于分析盆地及其主边界断裂的演化过程,也可以促进深层油气勘探和评价工作[7-8]。本文基于地震反射剖面地质解译成果,运用断层沿走向位移-长度曲线形态分析方法和沿倾向生长速率分析法,通过对徐家围子断陷边界断裂几何形态分析,研究其生长与演化过程,有助于认识盆地演化,且可以促进深层油气勘探。

1 地质构造背景

松辽盆地是一个中、新生代大型陆相沉积盆地,具有下断、上坳双重结构[9]。古中央隆起将深层断陷分隔成西部和东部两个断陷带。徐家围子断陷位于古中央隆起东部(图 1a),主体走向呈 NNW 和近 SN 向,面积 5 350 km^2,是一个南北狭窄、埋藏浅,中间宽、埋藏深的西断东超式箕状地堑(图 1b)。最大沉积厚度约 6 000 m,平均沉积厚度约 3 000 m,上部叠置有三肇凹陷。3 次构造运动形成了三纵两横 5 个构造带格局[10]。盆地西缘南北向叠接的徐西和宋西两条低角度断裂共同构成了边界断裂,并控制了徐家围子断陷的演化[5, 10-12]。

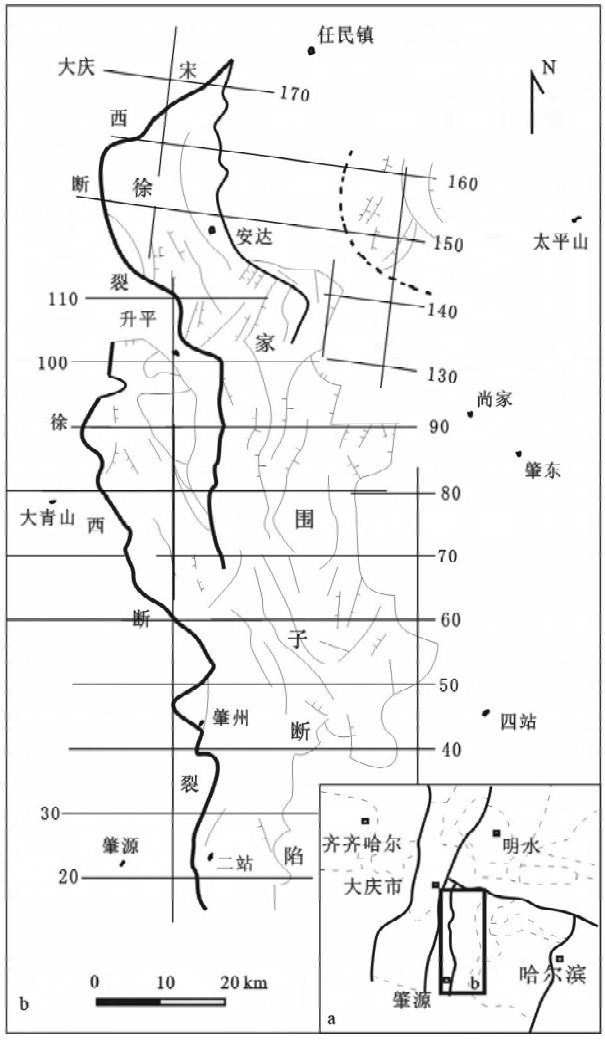

图 1 松辽盆地深层构造单元划分及研究区位置示意图(a)[9]和徐家围子断陷构造格局(b)

Fig. 1 Tectonic outline of deep layer of Songliao Basin (a) and tectonic framework in Xujiaweizi faulting depression (b)

2 研究方法

徐西和宋西两条断裂控制了徐家围子断陷的演化,属于生长断层或称同沉积断层。由于生长断层相关的沉积盆地内部沉积物记录了沉积史和断裂演化史之间的相互作用,因此这种断层是进行运动学分析的最佳对象[13-15]。近年来研究发现,断层运动的结果除引起断层位移随时间累积以外,断层长度也随时间增加[16-25],一些学者重点研究了正断层侧向生长形成的形态,以及位移量和长度之间的关

系[26-31]。本文对生长正断层运动的研究主要包括两个方面,即(1)在平行于断层倾向的剖面上进行上、下盘厚度相关性的研究[32-33];(2)沿断层走向断层形态的研究[34-37]。

2.1 正断层位移-长度关系分析方法

正断层位移-长度关系分析将断层的研究从二维扩展到三维。近年来,在研究中不断得到应用,并成为一种成熟的方法。

正断层生长是一个递进的动态过程,大量延伸短、位移小的正断层随着时间的推移,应力的增加,将逐渐连接成少量延伸长、位移大的断层,从而表现出在不同的演化阶段具有不同的位移分配样式[34,36]。经典的正断层生长连接模型是 Peacock 和 Sanderson (1991)建立的,他们通过研究英国 Somerset 的 Kilve 正断层带,提出正断层生长连接过程的四阶段模式[34](图 2)。(1)第一阶段:断层各自生长,位移和长度同时增加,其比值保持不变,断层之间没发生重叠或相互作用;在两条断层的断错(offset)处,总位移为零(图 2a)。(2)第二阶段:断层之间发生重叠,通过应力域发生相互作用,位移被传递斜坡(relay ramp)调节;在重叠处位移梯度(displacement gradients)变大,且总位移最小(图 2b)。传递斜坡是两条倾向相同正断层之间的转换带,为了调节断层之间的位移,地层发生倾斜和旋转[23,34,36]。(3)第三阶段:新生的连接断层从破坏传递斜坡开始(图 2c),逐渐将两侧小型断层连接并持续演化。(4)第四阶段:两侧小型断层被新生的连接断层连接成一条大规模的断层,斜坡作为正牵引被保存,在连接位置形成断层位移最小值(图 2d),随后,断层连接进入下一次循环。在第二阶段,断层段之间只通过应力发生相互作用,称为软连接,而断层段之间有新生的断层连接时,则称为硬连接[38-39]。

多条断层发生连接时,其位移-距离剖面常呈锯齿状,位移极小值一般对应着断层的连接位置[12,34,36]。

2.2 断层最大位移与长度的比值

人们很早就发现断层的位移(D)和长度(L)具有一定的比例关系,在脆性应力状态下,建立了断层生长的 $D \propto L^2$ 模式[18,22]和 $D \propto L^{1.5}$ 模式[25]。一些学者考虑到断层两端的韧性变形,建立了 $D \propto L$ 断层生长模式[38-39]。还有一些断层的位移-长度关系曲线形态变化较大,可能是由断层连接造成的[26]。

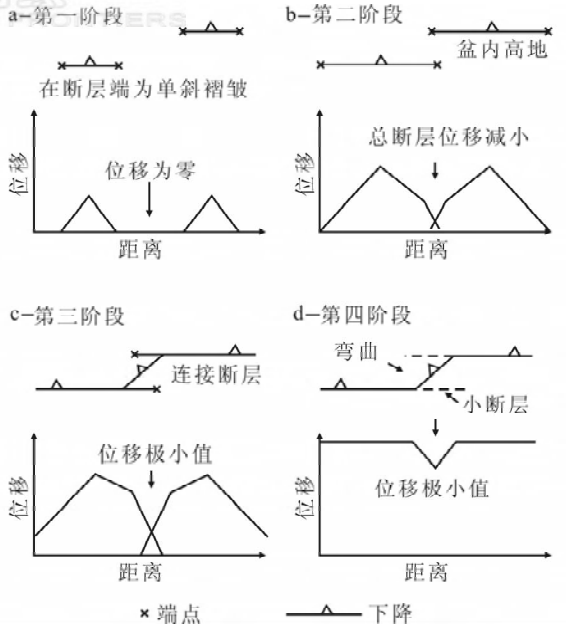

图 2 断层生长连接过程 4 个阶段的位移-长度图[34]

Fig. 2 Diagrams of four stages of fault development and corresponding displacement-distance graphs

尽管断层的连接使位移-长度模式变得复杂,但复杂的位移-长度模式仍可用于揭示正断层的连接生长过程[26,30-31]。

Cowie 和 Scholz (1992)拟合出的一条直线 $D \propto L$[39],将数值投影区划分为两个区域(图 3),对应于几何形状的 3 种类型。它们所表示的意义分别为:直线 $D \propto L$ 表示正常生长的单条断层及硬连接结束后的断层,与其他断层没有发生相互影响;直线 $D \propto L$ 以上的区域。在软连接阶段,相互作用段的断层位移由于应力增加而突然变大,而长度几乎不变,因此,比值变大,其投点位于位移-长度拟合线之上[34-36,45];直线 $D \propto L$ 以下的区域。由于多条断层发生硬连接时,断层长度突然增大而位移几乎不变,因此比值变小,投点位于位移-长度拟合线之下[26]。

根据断层位移-长度剖面的几何形态和断层发育阶段,可将断层的位移-长度模式粗略划分为 3 种类型:(1)对称的几何形状(三角状、平顶状、椭圆状或钟状),断层的 D/L 值随时间的改变不发生变化,与位移-长度拟合线重合,代表比较简单的单条断层[18,22,25,34,37-38];(2)不对称的几何形状(三角状、平顶状、椭圆状或钟状),断层的 D/L 值随时间的改变逐渐变大,位于位移-长度拟合线之上,代表和相

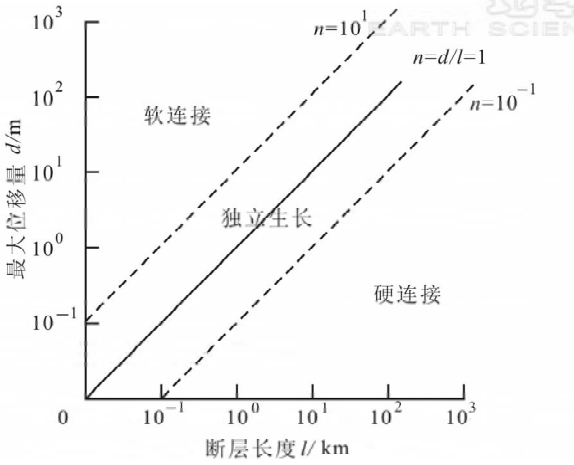

图 3 位移-长度对数关系图
(据 Cowie 和 Scholz[39],略有修改)
Fig. 3 Diagram of displacement-distance graphs

邻断层相互作用的断层[28-29,34-36,45];(3)不规则的锯齿状,断层的 D/L 值随时间的改变逐渐变小,位于位移-长度拟合线之下,代表由多条断层段连接而形成的断层,在连接处位移有最(极)小值[26,31,34-36,45]。

2.3 断层生长速率的比较

生长断层的最大特点是两盘地层厚度明显不同(图 4)。常用断层生长指数、古落差和断层生长速率反映生长断层沿倾向的活动强度[15,32-33]。为了表明构造强度与时间尺度的关系,同时考虑到文章中研究的断层是多期活动的叠加,笔者采用了断层生长速率方法。

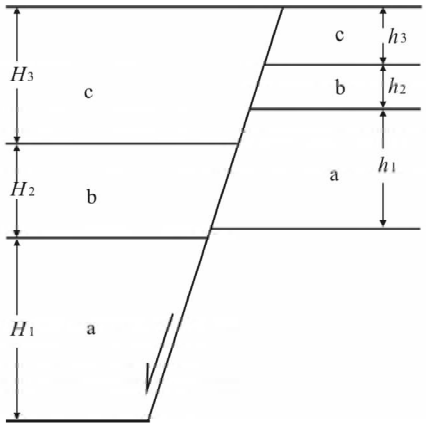

图 4 断层生长速率示意图
Fig. 4 Diagram of growth rate of fault

断层生长速率(ν)求取的方法

$$\nu=D_i/t$$

其中,$D_i=H_i-h_i$,D_i 为第 i 时期生长断层的古落差,m;H_i 为第 i 时期下降盘厚度,m;h_i 为第 i 时期上升盘厚度,m;t 为第 i 时期经历的时间值,Ma。

将沿生长断层走向不同测线获得的沉积速率和长度数据投影到生长速率图中,生长速率-长度曲线的几何形态也可分为 3 种,基本上与位移-长度曲线相似,但在第三种不规则的锯齿状形态中,生长速率极大值位于连接部位,对应于位移极小值的部位。将这一方法运用于边界断层的研究,对比不同时期沉积速率的变化,可以识别沉积中心迁移的规律。并结合断层位移-长度关系的研究,能够更加准确地鉴别出传递斜坡及连接所在位置。

3 数据分析

研究中所用到的数据来源于 1998 年及 1999 年徐家围子地区的地震勘探资料,测网密度约为 2 km×4 km。采用叠偏剖面成图,使断点位置更加准确;采用空间分层变 V_0、变 β 参数,反映地下速度参数在各构造单元上的变化情况;利用新编空间归位技术消除人为因素而产生的误差。经过精细的解译后,在每条测线上,统计各个时期断层的倾向离距、断层两侧地层的厚度,识别构造变形样式,并在局部地方进行了下盘剥蚀地层恢复。利用分布于区内的深钻井资料,进行对井误差的计算,相对误差为 4.8%~0.17%,符合精度要求。

3.1 徐西断层

徐西断层是边界断层的重要部分,影响徐家围子断陷的发生、发展和消亡。总体走向 NNW—SN 向,呈"蛇状"弯曲,平面延伸长度 96 km,断面东倾,倾角 10°~15°,为一低角度正断层。倾向离距一般位于 2 000~4 000 m 内,最大 9 529 m,最小 24 m。D/L 值为 0.099。

3.1.1 徐西断层的几何分段

在徐西断层位移-长度图(图 5a)上,累计倾向离距的剖面形态呈锯齿状,具有可比性的极小值在北端出现,极大值在中部出现。依据可比极小值的位置可分为 3 段,其中第一段的 D/L 值约 0.13;第二段的 D/L 值约 0.67;第三段的 D/L 值约 0.33。同样原理,在第一段内划分出 4 个亚段,每个亚段的极大值均向北偏移,D/L 值由南向北依次为 0.17、0.29、0.53 和 0.33,呈现与相邻断层相互作用的断层特征。分界处大多与地震剖面解译的盆内高地位置吻合。

3.1.2 徐西断层的活动过程

从徐西断层的断层生长速率图(图 5a)、断层位移-长度图(图 5b)上可以看出,徐西断层形成时间不晚于沙河子期;主要活动时间为沙河子期和营城期两期,营城期后也有活动。

(1)沙河子期:D/L 值约 0.077。长度-位移曲线呈锯齿状结构(图 5a),表明在沙河子期已经发生了连接作用,按极小值的分布可以划分至少 11 条先存小断层。这些小断层构成了两个小型的连接中心(图 5a),但生长速率的整体形态表明仍然受小断层控制(图 5b),在两个小型的连接中心,并没有呈现高速的生长速率,所以,断裂生长基本处于硬连接的初期。

(2)营城期:D/L 值约为 0.053。长度-位移曲线也呈锯齿状结构(图 5a),在 30 测线至 50 测线间断层连接部位的生长速率接近或大于相邻部位的生长速率(图 5b),表明营城期继承了沙河子期的构造特征,在断层连接部位进行生长造成该处位移量的增大,进入了硬连接的发展阶段。

(3)营城期后:徐西断层的长度-位移曲线由彼此间没有连接的三角形组成,主要分布于断层的中部,倾向离距不超过 700 m,极大值分布特征表明:一方面徐西断层在此时只是具有局部活动的特征;另一方面,断层的活动不是沿整条断层同时发生,而是有选择地分段进行,虽然断层的活动强度较小,分布稀疏,但仍可以看出,断层的活动仍然主要分布在断层的连接部位或附近。

根据沙河子期的平均生长速率(35 m/Ma)大于营城期的平均生长速率(18 m/Ma),同时沙河子组超覆于火石岭组顶面之上,向断层根部楔状加厚,营城组没有明显的楔状加厚特征,断层下盘普遍缺失火石岭组、沙河子组沉积,因此沙河子期徐西断裂更

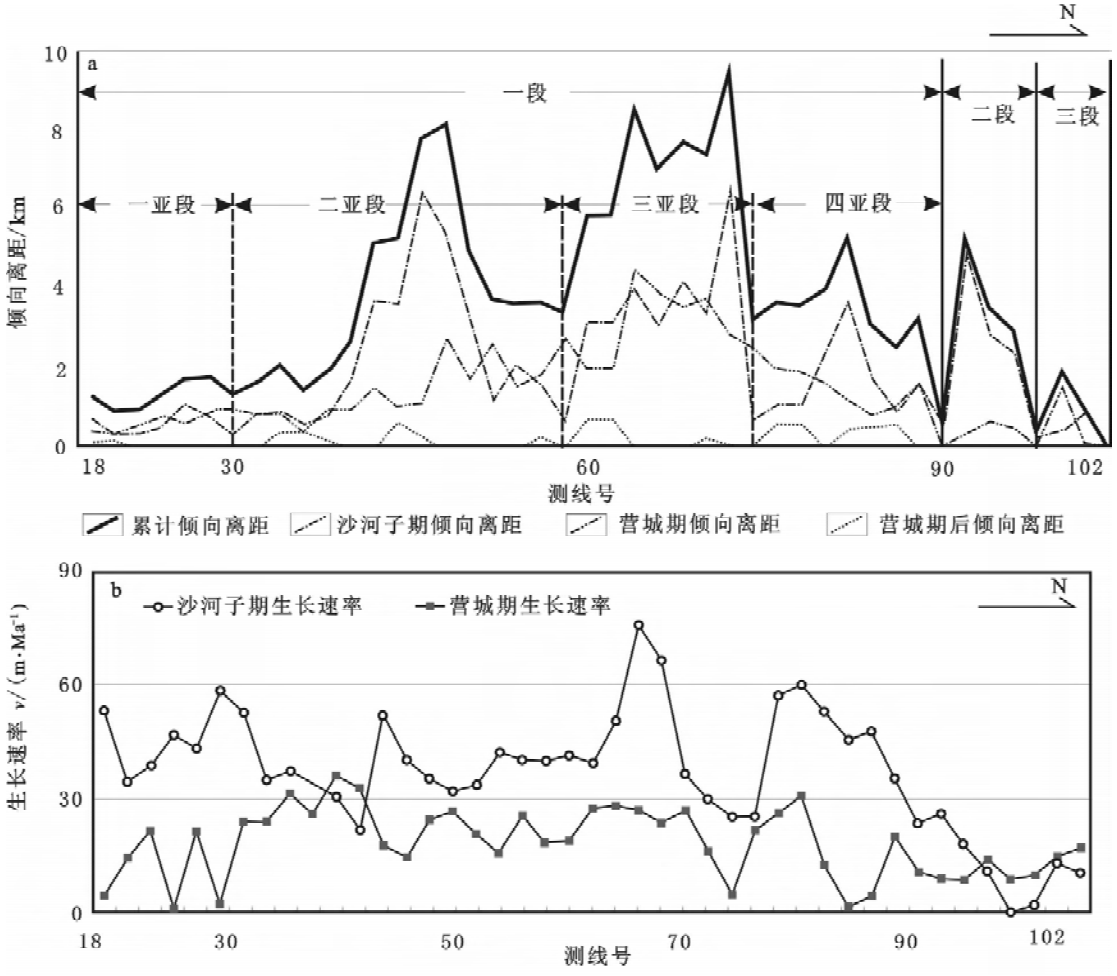

图 5 徐西断层位移-长度图(a)和断层生长速率图(b)

Fig. 5 Displacement-distance graphs (a) and growth rate graphs (b) of Xuxi fault

加活动。

3.2 宋西断层

宋西断层不但控制了徐西断陷北段的发育,还与徐西断层共同控制了徐家围子断陷的演化(图1)。总体走向 NNW—SN 向,平面延伸 73 km,断面东倾,倾角 10°~25°,为一低角度正断层。平均倾向离距约 1 860 m,最大 2 947 m,最小 366 m。D/L 约 0.16。

3.2.1 宋西断层的几何分段

在位移-长度图(图 6a)上,累计倾向离距的剖面形态呈锯齿状(146 测线以南)和三角状(146 测线以北)并存的结构。依据可比极小值的位置可以分为两段:第一段 D/L 约 0.246;第二段 D/L 约 0.346。第一段可以划分出 4 个亚段,D/L 由南向北依次为 0.37、0.756、0.77 和 0.88。在地震剖面上断层连接处对应位置与伴生构造单元中的盆内高地特征相吻合,呈现与相邻断层相互作用的断层特征。

3.2.2 宋西断层的活动过程

火石岭组在断陷内的沉积厚度较均一,宋西断层上、下盘火石岭组沉积厚度基本一致,表明该断层没有控制火石岭组的沉积。火石岭期构造活动微弱,可能只是形成了一些小断裂的雏形。

(1)沙河子期:D/L 值约 0.106。长度-位移曲线呈锯齿状(图 6a),依据极小值分布可分为 4 段:D/L 由南向北依次为 0.18、0.10、0.25 和 0.23。146 线以北,由于没有可对比的极小值,无法进行详细的分段,所以它的成因和生长过程还有待于进一步研究。146 线以南,连接部位大多有盆内高地存在,局部地区不明显,可能是受后期改造的影响。除 88 测线附近断层连接部位的生长速率增大外,其他位置生长速率曲线的形态基本与位移曲线形态相似(图 6b),所以断裂生长处于软连接阶段。

(2)营城期:D/L 值约为 0.087。长度-位移曲线呈锯齿状结构,极大值在北段偏移不明显,在南段略向南偏移。同样可以分出两段,D/L 由南向北依次为 0.14、0.16。若不考虑 146 线以北的部分,那么可以识别出 146 线以南 84 测线附近的生长速率极大值,它的形成是由于断层连接部位的强烈活动,

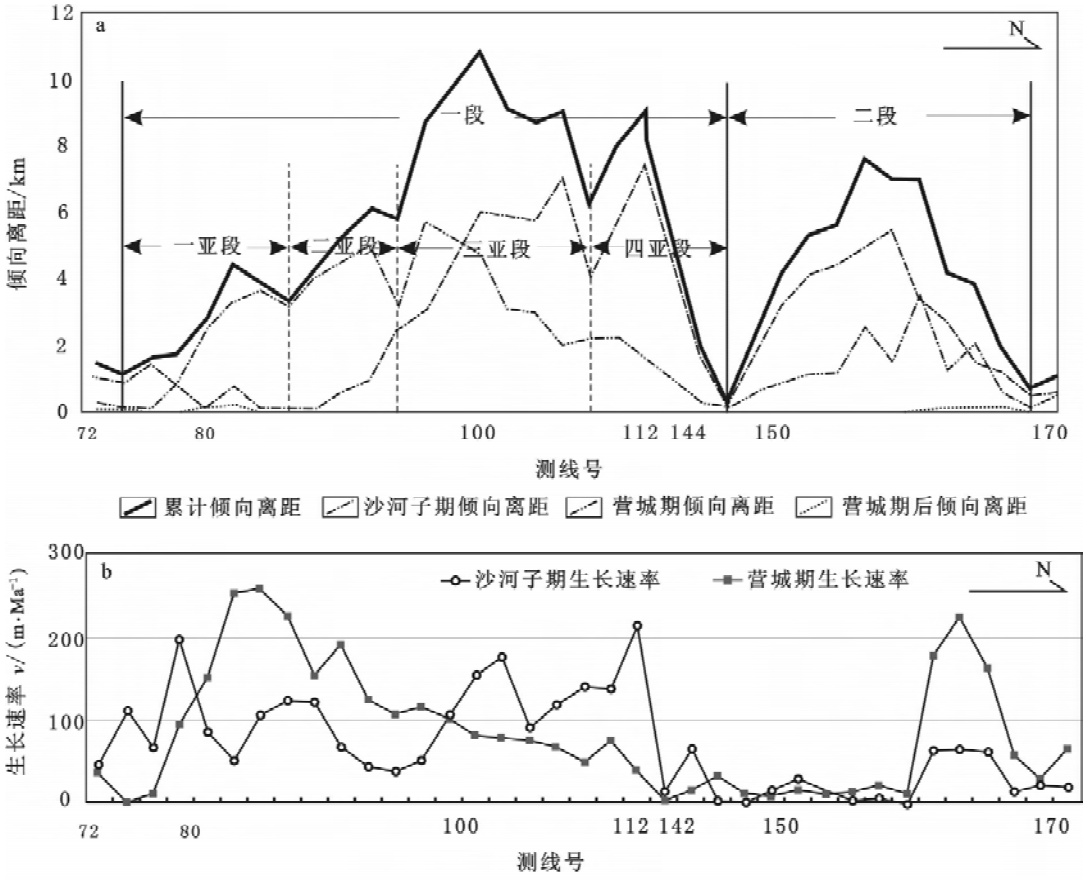

图 6 宋西断层位移-长度图(a)和断层生长速率图(b)

Fig. 6 Displacement-distance graphs (a) and growth rate graphs (b) of Songxi fault

位移量迅速增大,表明营城期继承了沙河子期的构造特征,断层处于硬连接的阶段。

(3)营城期后:断层的长度-位移曲线呈现彼此间没有连接的三角形,主要分布于断层的两端,倾向离距不超过 300 m。表明宋西断层只是在断层的连接部位或附近局部活动。

综上所述,断层主活动期为沙河子—营城期。宋西断层在沙河子组沉积时期平均生长速率(71 m/Ma)和营城组沉积时期平均生长速率(85 m/Ma)均较大,特别是 78 测线至 98 测线间区段形成峰值,断层形迹主要形成于营城组沉积时期。但两个时期断裂的生长速率均大于徐西断裂的生长速率。

3.3 控陷断裂的演化

在两条断裂生长过程的研究中发现徐西断裂和宋西断裂的 D/L 值差别较大,是什么原因产生这种现象?同时根据断层的生长和连接理论,断层的连接部位是断层生长的主要地点,宋西断裂营城期内在 78 测线到 98 测线之间断层的快速生长,与由理论推断得到的生长点相左,是什么原因导致这一现象的?为了解决这些问题,基于徐西和宋西断层的倾向离距累加值与长度关系图,笔者进行了初步的探讨(图 7)。

在位移-长度图上(图 7),累计倾向离距的剖面形态呈锯齿状。依据 146 测线的最小值分为两段,南侧根据极小值的位置可以细分。最大位移量在 100 测线处,呈现向北偏移的形态,可能指示控陷断裂还受区域应力场的影响,仍有调节的空间,D/L 值为 0.105,表明徐西、宋西两条断层硬连接已经基本完成,调节的空间较小。在硬连接过程中,宋西断层的强烈活动造成它的 D/L 值较大。

沙河子期分段特征明显,具有可比性的极大值和极小值基本相同,且近等间距分布,表明各段的规模和强度相似,呈现分段生长的特征,当然每一段可以由多个亚段组成。在营城期及营城期后断层在断层连接处均有不同程度的生长,78 测线到 98 测线之间正处于两条断层连接的主要部位,断层的生长速度最快。

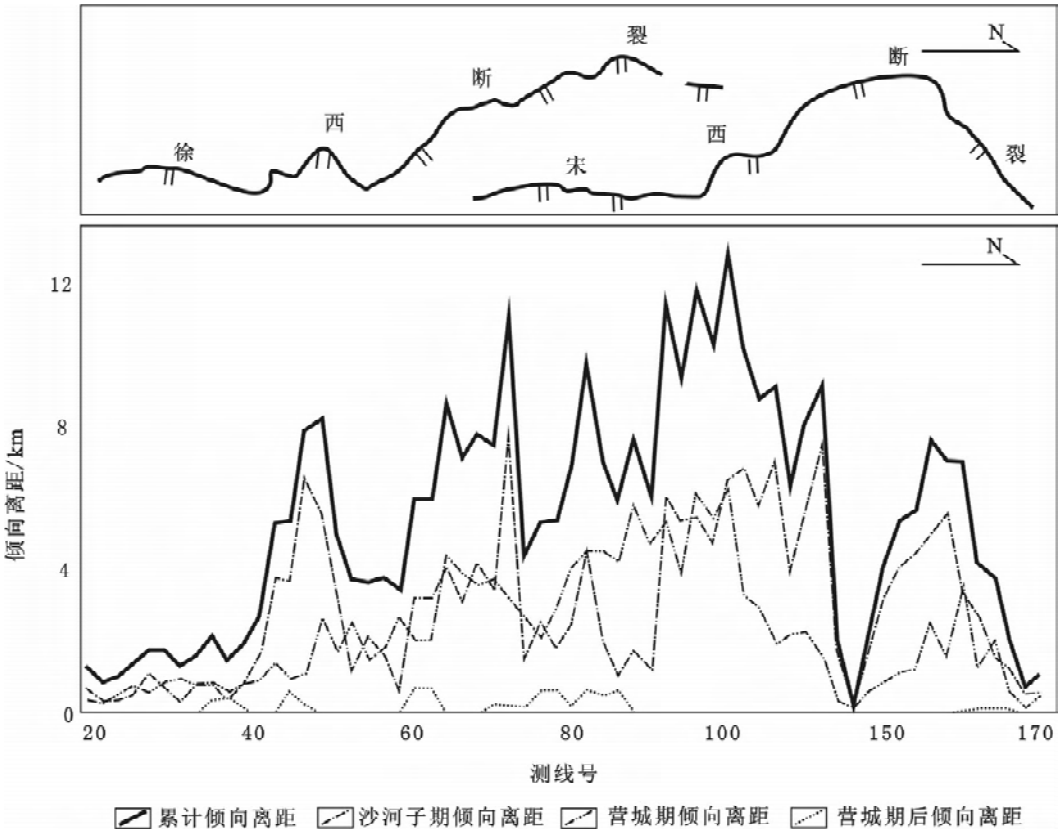

图 7 徐西—宋西断层位移-长度图

Fig. 7 Displacement-distance graphs of Xuxi-Songxi faults

地学前缘 EARTH SCIENCE FRONTIERS

4 结论与讨论

通过本文的研究,可以得到以下结论:

(1)沙河子期徐西断层的平均生长速率为 35 m/Ma,宋西断层的平均生长速率为 71 m/Ma,营城期徐西断层的平均生长速率为 18 m/Ma,宋西断层的平均生长速率为 85 m/Ma。沙河子期为最主要的生长期,包括徐西、宋西断层在内的控陷断裂平均生长速率大于 60 m/Ma。在营城期宋西断层的活动强度远大于徐西断层。

(2)在沙河子期,徐西断层和宋西断层基本处于独立生长的状态,形成各自的小型断陷盆地,具有多个沉积中心,徐西断层处于硬连接状态的初期,宋西断层处于软连接状态,只在两条断裂重叠的部位发生微弱的软连接。营城期二者发生硬连接,并持续至硬连接基本结束,以连接处宋西断层的强烈活动为特征,断陷盆地的规模随之扩大,沉积厚度逐渐增加。营城期后断层只在局部连接地点发生微弱活动。

(3)徐家围子油气田的分布基本与生长断层伴生的盆内高地、转换带和传递斜坡等构造位置相吻合。传递斜坡连接着断裂系统的上、下盘,是油气运移和聚集的有利部位[34-36,46]。因此,对它的深入研究将有助于油气勘探。

(4)徐家围子断陷是多期构造活动的产物,相对于伸展作用而言,改造作用相对较弱[10-11]。北部断裂的伸展活动强度和控制断陷沉积的作用均较南部强,控陷断裂的演化表明,近南北向的压扭应力场控制了断陷层的构造格局。就伸展过程而言,地幔上涌可能是主要动力来源[47]。

在成文过程中得到贾庆军高级工程师的支持和帮助,在此表示感谢。

References:

[1] Dai J X, Xia X Y, Wei Y Z. Reestimation of natural gas resources and reserves in China—With concerning to reserves for "West-East natural gas transmission" project[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(1): 1-3(in Chinese).

[2] Wang T B. Theory progress of natural gas geology and strategy of gas exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(1): 1-7(in Chinese).

[3] Zhou Q H, Feng Z H, Men G T. The relationship between present ground temperature and generation of gas in Xujiaweizi rift in Songliao Basin[J]. Science in China: Series D, 2007(Suppl 2): 177-189(in Chinese).

[4] Guo J, Chen S T, Wang W L, et al. The lithochemistry feature of volcanic rock in Xujiaweizi rift, Songliao Basin[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2000, 30(3): 243-245(in Chinese).

[5] Yin J Y, Liu H P, Chi H J. Evolution tectonic in Xujiaweizi Depression in Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002 (2): 26-29(in Chinese).

[6] Jin X H, Lin R Z, Zhou H Y, et al. Volcanic activities and evolution of source rocks in Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(3): 349-355(in Chinese).

[7] Hou Q J. Exploration scheme of gas in Gulong Area in Songliao Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5): 38-41(in Chinese).

[8] Wang G W, Hui S, Fu G. Gas distribution rules and main controlling factors in Xujiaweizi rift[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(1): 6-9(in Chinese).

[9] Chi Y L, Yun J B, Meng Q A, et al. Deep Structure and Dynamic of the Songliao Basin for Hydrocarbon Accumulation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 69-113(in Chinese).

[10] Zhang W J, Ren Y G, Chen J L, et al. Characteristic of compression deformation of Xujiaweizi Rift in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008 (4): 21-25(in Chinese).

[11] Liu X F, Zhong G F, Wang Z Y, et al. Tectonic framework of Xujiaweizi fault depression in Northern Songliao Basin and its origin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2006, 21(4): 6-10(in Chinese).

[12] Zhang J L. The Tectonic Characteristics and Evolution of the Middle Part of the Central Depression in Songliao Basin During the Early Cretaceous[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2005: 25-70(in Chinese).

[13] Qi J F, Chen F J. Structural style in Liaohewan-Xialiaohe basin [J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13(3): 272-283(in Chinese).

[14] Tang L J, Jin Z J. The analysis of stage and strong of inversion thrust[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 1999, 23(6): 1-5(in Chinese).

[15] Zhao Y, Dai J S. Identification of growth fault by fault fall analysis[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 13-15(in Chinese).

[16] Wernick B, Burchfiel B C. Modes of extensional tectonics [J]. Journal of Structural Geology, 1982, 4: 105-115.

[17] Gibbs A D. Structural evolution of extensional basin margins

[J]. Journal of the Geological Society, 1984, 141: 609-620.

[18] Watterson J. Fault dimensions, displacements and growth [J]. Pure and Applied Geophysics, 1986, 124: 365-373.

[19] Atkinson B K, Meredith P G. Experimental fracture mechanics data for rocks and minerals[M]//Atkinson B K. Fracture Mechanics of Rock. London: Academic Press, 1987: 111-166.

[20] Barnett J A, Mortimer J, Rippon J H, et al. Displacement geometry in the volume containing a single normal fault[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1987, 71: 925-937.

[21] Walsh J J, Watterson J. Distributions of cumulative displacement and seismic slip on a single normal fault surface[J]. Journal of Structural Geology, 1987, 9: 1039-1046.

[22] Walsh J J, Watterson J. Analysis of the relationship between displacement and dimensions[J]. Journal of Structural Geology, 1988, 10: 239-247.

[23] Larsen P H. Relay structures in a Lower Permian basement-involved extension system, East Greenland[J]. Journal of Structural Geology, 1988, 10: 3-8.

[24] Mandl G. Mechanics of tectonic faulting—Models and basic concepts[M]//Zwart H J. Developments in Structural Geology. Amsterdam: Elsevier, 1988.

[25] Marrett R, Allmendinger R W. Estimates of strain due to brittle faulting: Sampling of fault population[J]. Journal of Structural Geology, 1991, 13: 735-738.

[26] Cartwright J A, Trudgill B D, Mansfield C M. Fault growth by segment linkage: An explanation for scatter in maximum displacement and trace length data for the Canyonlands grabens of SE Uath[J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17: 1319-1326.

[27] Schlische R W, Anders M H. Stratigraphic effects and tectonic implications of the growth of normal faults and extensional basins[M]//Beratan K K. Reconstructing the History of Basin and Range Extension Using Sedimentology and Stratigraphy. Spec Pap Geol Soc Am, 1996, 303: 183-203.

[28] Willemse E J M, Pollard D D, Aydin A. Three-dimensional analysis of slip distributions on normal fault arrays with consequences for fault scaling[J]. Journal of Structural Geology, 1996, 18: 295-310.

[29] Willemse E J M. Segmented normal faults: Correspondence between three-dimensional mechanical models and field data [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 675-692.

[30] Morley C K. Patterns of displacement along large normal faults: Implications for basin evolution and fault propagation, based on examples from East Africa[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1999, 83: 613-634.

[31] Mcleod A E, Dawers N H, Underhill J R. The propagation and linkage of normal faults: Insights from the Strathspey-Brent-Statfjord fault array, northern North Sea[J]. Basin Research, 2000, 12: 263-284.

[32] Li Q Y, Luo F Z, Miao C Z. Study about the research method on activity of faults and its application[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2000, 7(2): 15-17(in Chinese).

[33] Xiao Y Y, Hao X F. The limitation application of fault growth index in sequence stratigraphy[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(Suppl): 1-2, 5(in Chinese).

[34] Peacock D C P, Sanderson D J. Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones[J]. Journal of Structural Geology, 1991, 13(6): 721-733.

[35] Peacock D C P, Sanderson D J. Geometry and development of relay ramps in normal fault systems[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1994, 78: 147-165.

[36] Peacock D C P. Propagation, interaction and linkage in normal fault systems[J]. Earth-Science Reviews, 2002, 58(1-2): 121-142.

[37] Gillespie P A, Walsh J J. Limitation of dimension and displacement data from single faults and the consequences for data analysis and interpretation[J]. Journal of Structural Geology, 1992, 14: 1157-1172.

[38] Cowie P A, Scholz C H. Physical explanation for the displacement-length relationship of faults a post-yield fracture mechanics model[J]. Journal of Structural Geology, 1992, 14: 1133-1148.

[39] Cowie P A, Scholz C H. Displacement-length scaling relationship for faults: Data synthesis and discussion[J]. Journal of Structural Geology, 1992, 14: 1149-1156.

[40] Cowie P A, Shipton Z K. Fault tip displacement gradients and process zone dimensions[J]. Journal of Structural Geology, 1998, 20: 938-998.

[41] Dawers N H, Anders M H, Scholz C H. Fault length and displacement: Scaling laws[J]. Geology, 1993, 21: 1107-1110.

[42] Dawers N H, Underhill J R. The role of fault interaction and linkage in controlling syn-rift stratigraphic sequences: Late Jurassic, Stratfjord East Area, northern North Sea[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2000, 84: 45-64.

[43] Ding G Y, Tian Q J, Kong F C, et al. Segmentation of Active Fault[M]. Beijing: Seismological Press, 1993: 19-38(in Chinese).

[44] Cheng S P, Yang G Z. The development of Jiugongkou fault in Wei Country in Heibei Province[J]. Seismology and Geology, 1998, 20(1): 1-8(in Chinese).

[45] Gupta A, Scholz C H. A model of normal fault interaction

based on observations and theory[J]. Journal of Structural Geology, 2000, 22: 865-879.

[46] Kornsawan A, Morley C K. The origin and evolution of complex transfer zones (graben shifts) in conjugate fault systems around the Funan Field, Pattani Basin, Gulf of Thailand[J]. Journal of Structural Geology, 2002, 24: 435-449.

[47] Yun J B, Jin Z J, Yin J Y, et al. Reflection feature and geodynamic significance of deep seismic reflection in Xujiaweizi region of North Songliao Basin, China[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 307-314(in Chinese).

参考文献:

[1] 戴金星,夏新宇,卫延召. 中国天然气资源及前景分析——兼论"西气东输"的储量保证[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(1): 1-3.

[2] 王庭斌. 中国天然气地质理论进展与勘探战略[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 1-7.

[3] 周庆华,冯子辉,门广田. 松辽盆地北部徐家围子断陷现今地温特征及其与天然气生成关系研究[J]. 中国科学: D辑, 2007(增刊2): 177-189.

[4] 郭军,陈守田,王维林,等. 松辽盆地徐家围子断陷火山岩岩石化学特征及其构造环境[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(3): 243-245.

[5] 殷进垠,刘和甫,迟海江. 松辽盆地徐家围子断陷构造演化[J]. 石油学报, 2002(2): 26-29.

[6] 金晓辉,林壬子,邹华耀,等. 松辽盆地徐家围子断陷火山活动期次与烃源岩演化[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 349-355.

[7] 侯启军. 松辽盆地古龙地区天然气勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 38-41.

[8] 王贵文,惠山,付广. 徐家围子断陷天然气分布规律及其主控因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(1): 6-9.

[9] 迟元林,云金表,蒙启安,等. 松辽盆地深部结构及成盆动力学与油气聚集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 69-113.

[10] 张文婧,任延广,陈均亮,等. 松辽盆地徐家围子断陷挤压变形特征[J]. 大庆石油地质与开发, 2008(4): 21-25.

[11] 刘学锋,钟广法,王正允,等. 松辽盆地北部徐家围子断陷构造格局及其成因[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2006, 21(4): 6-10.

[12] 张军龙. 松辽盆地中央坳陷区中部断陷期构造演化分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2005: 25-70.

[13] 漆家福,陈发景. 辽河湾—下辽河断陷盆地的构造样式[J]. 石油与天然气地质, 1992, 13(3): 272-283.

[14] 汤良杰,金之钧. 负反转断裂主反转期和反转强度分析[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1999, 23(6): 1-5.

[15] 赵勇,戴俊生. 应用落差分析研究生长断层[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 13-15.

[32] 李勤英,罗凤芝,苗翠芝. 断层活动速率研究方法及应用探讨[J]. 断块油气田, 2000, 7(2): 15-17.

[33] 肖英玉,郝雪峰. 断层生长指数在层序地层单元中应用的局限性[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(增刊): 1-2, 5.

[43] 丁国瑜,田勤俭,孔凡臣,等. 活断层分段——原则、方法及应用[M]. 北京: 地震出版社, 1993: 19-38.

[44] 程绍平,杨桂枝. 河北蔚县九宫口断层重叠带的断层生长、位移转移和演化[J]. 地震地质, 1998, 20(1): 1-8.

[47] 云金表,金之钧,殷进垠,等. 松辽盆地徐家围子地区深反射结构及其盆地动力学意义[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 307-314.