逆冲断层位移—长度关系解析

——以杭锦旗断裂带为例

李书林¹),李良²),贾会冲²),张威²),徐恒艺¹),杨明慧^{1,3})

2)中国石化华北油气分公司勘探开发研究院,郑州,450006;

3)中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京,102249

内容提要:为了揭示鄂尔多斯盆地北部杭锦旗断裂带在晚石炭世—中三叠世逆冲断层生长的位移模式和位 移—长度关系,本文通过地震剖面解释、地层回剥分析和断层古位移测算来厘定古断层的末端位置,明确断裂生长 连接历史,并结合幂律关系,探究了断层生长模式以及断裂带岩性组合、运动学、反转和断层系统内在特征等方面的 影响。研究表明,杭锦旗断裂带的构造演化受基底断裂的分段性制约。其北东走向的分段(泊尔江海子断裂东段) 形成较早;在垂向上,断裂中部的位移大,向两端递减;在平面上,断裂末端与东西走向的分段(泊尔江海子断裂西 段)叠覆,导致局部位移增大,最终发生硬连接。东西走向的三眼井断裂形成于晚石炭世,先后经历了断层分段、横 向扩展和连接的演化阶段。乌兰吉林庙断裂作为调节带断裂,其活动相对较弱且局部发生反转。根据断层位移— 长度剖面的几何形态和断层演化阶段分析,可将杭锦旗断裂带的逆冲阶段的位移模式分为4种类型:①近对称的三 角状或椭圆状,代表独立断层;②左右极不对称的锯齿状或双峰状,代表断层之间发生软连接作用;③不规则波状, 反映多条小型断层的连接作用;④异常尖峰状,代表大型断裂后期位移的调整。杭锦旗断裂带的D_{max}/L数据集与全 球其他地区比较,要低一个数量级,可能与断裂带的后期反转有关。最后,针对杭锦旗断裂带在不同时期的构造演 化和 D_{max}/L 变化特征,提出了断裂带逆冲阶段演化的路径模式。

关键词:逆冲断层;古断距;断层生长连接;位移一长度关系;位移模式;杭锦旗断裂带;鄂尔多斯盆地

大型断裂系统的演化是动态的。单次地震事件 和长期累积滑移的结合能够实现断层的生长 (Manighetti et al., 2005)。生长过程可分为两类:① 横向扩展的生长(Watterson, 1986; Walsh and Watterson, 1988; Cowie and Scholz, 1992a);②分段 连接的生长(Dawers et al., 1993; Anders and Schlische, 1994; Jackson and Leeder, 1994; Kim and Sanderson, 2005)。当应变增强时,一个由多数小断 层组合的早期断层群将演化成由少数断层构成的晚 期断层群(Gupta et al., 1998),最终形成大型断裂 带。

断层位移—长度关系是分析断层构造变形强度的有力工具(Schlische et al., 1996; Torabi and Berg, 2011),在区域构造研究、断层生长模型约束甚至在断裂系统相关油气藏圈闭的演化分析中均起重大作用(Bergen and Shaw, 2010)。因此,针对正断层的

位移剖面、断层沿走向的详细位移模式等,前人提出 了利用幂律关系表明最大位移(D_{max})与断层长度 (L)关联的统计关系,通常称之为位移—长度(比 例)关系,即:D=c·Lⁿ。其中,c是与岩石力学性质 (剪切强度、弹性等)相关的参数(Cowie, 1998; Ackermann et al., 2001; Kim and Sanderson, 2005; Schultz et al., 2008); 而指数 n 的值介于 0.5~2.0 (Cowie and Scholz, 1992a; Schultz et al., 2008; Xu Shushan et al., 2016)。当n=1时,断层演化具有自 相似性的分形特征(Schultz et al., 2008);当 $n \neq 1$ 时,Kim和Sanderson(2005)认为断层系统具有与位 移--长度比例相关的几何形状,而且地震破裂的 D_{max}/L 范围在 $10^{-5} \sim 10^{-4}$;其中,走滑和倾滑断层分 别在 $10^{-2} \sim 10^{0}$ 和 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ 。 Walsh 和 Watterson (1988)、Marrett 和 Allmendinger(1991)以及 Cowie 和 Scholz(1992b) 通过汇编不同构造环境中的断层

¹⁾中国石油大学(北京)地球科学学院,北京,102249;

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41172127,41572102)的成果。

收稿日期:2018-07-18;改回日期:2019-01-09;责任编辑:刘志强。Doi:10.16509/j.georeview.2019.02.003

作者简介:李书林,男,1994年生,硕士研究生,构造地质学专业,Email:1037584980@qq.com。通讯作者:杨明慧,男,1962年生,博士,教授,主要从事盆地构造分析等方面的教学和研究工作,Email:yangmh@cup.edu.cn。



图1鄂尔多斯盆地及研究区构造纲要图

Fig. 1 Structural map of the Ordos Basin and its adjacent regions

缝合线及断层据 Darby and Ritts, 2002; Ritts et al., 2004; Davis and Darby, 2010; Zhang Kaijun, 2012; Faure et al., 2012; Liu Shaofeng et al., 2013; 图 1b 据 Yang Minghui et al., 2013 简化;SF—三眼井断裂;WF—乌兰吉林庙断裂;PF—泊尔江海子断裂 modified from Darby and Ritts, 2002; Ritts et al., 2004; Davis and Darby, 2010; Zhang Kaijun, 2012; Faure et al., 2012; Liu Shaofeng et al., 2013; Yang Minghui et al., 2013);SF—Sanyanjing fault; WF—Wulanjilinmiao fault; PF—Porjianghaizi fault

位移—长度关系数据,探究了断层生长的一般模式 问题。

然而,关于逆冲断层的位移剖面研究较为少见。 对于盲冲断层,其部分位移可能通过褶皱形成而被 消耗;在地震剖面解释中,由于结构变形和地层重复 造成地震波速的复杂化,将使得地震反射剖面涣漫 不清。在逆冲断层显露的情况下,常在地表形成陡 坎、地层重复或塌陷,加之长期的风化剥蚀过程,均 会增加断层位移测算的误差(Davis et al., 2005)。 杭锦旗探区位于鄂尔多斯盆地北部(图1),沉积地 层近水平(<2°)(Darby and Ritts, 2002)。前人研究 多偏重于烃源岩、沉积储层和油气运移成藏等方面 (冯乔等,2006;孙宜朴等,2007;谢润成等,2010;陈 全红等,2012;纪文明等,2013;李金涛等,2015;张少 华等,2015;孙晓等,2016;Xu Qinghai et al., 2018), 仅少数涉及杭锦旗断裂的特征和演化(郑喜强等. 2006;薛会等,2009; Yang Minghui et al., 2013;李潍 莲等,2015;雷开宇等,2017)。本文通过高精度二维 地震剖面解释,分析杭锦旗断裂带几何形态、落差和 倾角的断层几何学特征:并结合地层回剥分析,沿断 裂走向测算不同时期的位移,厘定古断层的末端位 置,明确断裂生长连接历史。在此基础上,将不同断 层的位移、长度数据进行归一化处理,划分断层位移 剖面的曲线形态;最后,结合不同演化阶段的 c_n 和 D_{mm}/L数据的变化,从断裂带岩性组合、运动学、反 转和断层系统内在特征等方面的讨论,提出杭锦旗 断裂带的构造演化路径的模式。

1 地质背景

杭锦旗地区在下部的前寒武纪坳拉槽阶段和上部的克拉通盆地阶段分别发育两套断裂系统。盖层断裂与深部断裂虽存差异,但盖层破裂必然携带深部断裂活动的信息(丁国瑜,1992)。据丁燕云等(2000)研究,杭锦旗地区的构造发生、发展主要受EW向基底断裂的控制,NE向基底断裂仅在后期构造演化中存在一定的改造作用。杭锦旗断裂带由泊尔江海子断裂、乌兰吉林庙断裂和三眼井断裂组成,总体近EW向展布,右行左阶(图1b)。在晚古生代一早中生代构造层,杭锦旗断裂带经历两期挤压活动(图2),且在晚中生代发生扭张反转(Yang Minghui et al., 2015)。

地震剖面解释揭示,三眼井断裂走向近 EW,平 面延伸约 81.8 km,为南倾的正断层。该断裂错断上 古生界底与白垩系底之间的所有地层,断距上大下 小(图 3a 剖面)且呈西大东小的趋势。乌兰吉林庙 断裂走向近 NEE,延伸长度约 39 km,亦为南倾的正 断层。在纵向上,亦错切上古生界底至白垩系底之 间地层,断距自上而下减小(图 3b 剖面)。泊尔江 海子断裂为北倾逆冲断层,平面延伸约 97 km。自 西向东,走向由近 EW 变为 NE,中部则向南凸出,呈 弧形展布。该断裂长期活动,断穿地层较多。断距 上小下大,且在上古生界中最大(图 3c 剖面),约 334 m;局部地区发生反转,为正断距(图 3d 剖面)。 值得关注的是,乌兰吉林庙断裂与泊尔江海子断裂 呈背向叠覆状态,与三眼井断裂呈同向叠覆状态,具





有变换构造性质。

2 数据和方法

2.1 地震剖面数据解释

研究区目前被二维地震数据覆盖。基于井震结合,并辅以岩心生物地层、测井标志层识别,在晚石炭世至晚三叠世层段的解释层位包括 C₃t 底、P₁s 底、P₁x 底、P₂s 底、P₂sh 底、T₂e 底和 T₃y 底等。

2.2 古断距复原及(累积)位移计算方法

在断层两侧,断层演化的痕迹记录在断面倾角 和相同地层厚度的变化中。在不考虑压实的情况 下,通过近似替代,计算断层位移大小。即沿断层断面,地层错切的位移 d_i(图 4a, *i* 为地层编号,下同)。

时深转换的地震剖面上测量被错切地层的落差 (x,y,z)和断面倾角 (α,β,γ) (图 4b)。自上而下, 断层倾角沿断面从二马营组的 65°递减至太原组的 51°。将倾角值代入 2cos $\alpha/(\pi-2\alpha)$,即 AB/AB,分 别获数值 0.97 和 0.93,接近于 1。由 d_i 满足不等式 $AB < d_i < AB$,故 $d_i \approx AB$,即已错断地层之间的断层位 移 d_i 可用直角三角形的斜边长 d_i '近似替代,且曲面 弯曲程度越小,误差越小。

利用地层回剥,估算出不同时期的断层累积位 移 $D_i'(i = 1,2,3)$ 。在计算过程中,正断层的落差 取正值,而逆断层的落差取负值。如在地层 2 沉积 期(图 4c),断层的累积位移 D_2' 为:

$$D_2' = d_1' - d_3' = \frac{x}{\sin\alpha} - \frac{z}{\sin\gamma}$$
(1)

在地层 1 沉积期 (图 4d), 断层的累积位移 D_1' 为:

$$D_1' = D_2' - \left(\frac{y}{\sin\beta} - \frac{z}{\sin\gamma}\right)$$
$$= \frac{x}{\sin\alpha} - \frac{y}{\sin\beta}$$
(2)

在垂向上,如果断层错断多套地层(*i*>3),则不同时期地层的断层累积位移估值*D*_i'为:

 $D_{i}' = d_{1}' - d_{i+1}'(i=1,2\cdots)$ (3)

因断面倾角为视倾角,所获不同时期的断层累 计位移将受地层产状的影响:地层倾角越小,所获断 层的累计位移越趋近断层的真实位移值。

2.3 古断层末端重建

以断裂带的走向(EW)为横坐标,断层位移数 据为纵坐标,在直角坐标系中对不同时期的断层累 计位移进行投点(图5)。由于二维地震数据存在一 定的间隔,而且绝大多数的断层末端都位于地震剖 面之间,由此需要通过剖面上的数据进行估算,重建 古断层端点位置。在海西—印支期,研究区处于挤 压背景(Yang Minghui et al., 2013, 2015),断层的 古位移计算值<0。但一些剖面的计算值>0(其中, 最大7.58 m,最小0.02 m,平均2.36 m),表示该地 史时期的古断层未演化至该条剖面。由此,将相邻 剖面出现的正、负值点用线段连接起来,则可以用线 段与横轴的交点估算古地史时期的断层横向尖灭 点。

在泊尔江海子断裂的走向转变区域(图5虚线







图 4 地层回剥分析的累积位移 d_i'计算方法图示

框),部分剖面点控制的古位移值保持不变(图 5c、 d);具有相同特征的点会随着断层的演化而逐渐增 多,且最终在新断层 F4 与古断层 F1 的断面交线处 消失(图 5d)。当新断层 F4 与断层 F1 发生连接时, 新断层将完全替代消亡的断层段,继续断层的演化 (图 5c、f)。故 F4 的末端将作为连接断层(F1+F4) 的一个末端进行重建。

3 晚石炭世—中三叠世断裂带演化

根据上述方法,计算不同时期的断层末端和累

积位移;结合断层的平面展布,制作位移—长度关系 剖面,分析断层的生长和连接过程。针对杭锦旗断 裂带的三条主干断层,前人提出了分段、连接和反转 的断层演化模型(Yang Minghui et al., 2013; Xu Qinghai et al., 2018)。在此基础上,本文根据断层 位移长度的扩展速率和位移剖面形态(图 5),将杭 锦旗断裂带分为三个条带(Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ)进一步研究。

3.1 东西向断裂作用带

该带位于三眼井断裂西段(图 5 I)。Wells 和 Coppersmith(1994)认为,地震活动产生的位移(u)

Fig. 4 Illustration of Cumulative displacement d_i' calculation method for stratigraphic stripping





Fig. 5 Displacement—length evolution profile of Taiyuan age to Ermaying age of main fault in the Hangjinqi area of the Ordos Basin

和破裂长度(*Ls*)的函数关系满足:lg(*u*) = -1.38+ 1.02×lg(*Ls*);在不同的滑移强度和构造背景下,这 一函数关系不会得到显著地修正,且*u*/*Ls*的范围在 10⁻⁵~10⁻⁴。三眼井断裂在晚石炭世位移较小,*D*_{max}/ *L*在3×10⁻⁴~4×10⁻⁴。由于该值介于上述*u*/*Ls*范围 内,表明三眼井断裂在晚石炭世开始发育。山西期, 该断裂以沿走向扩展为主,小断层之间发生连接,最 大位移点向断层中心转移,并在末端发育新生的断 层。下石盒子期,断层完全连接,横向扩展弱化,进 入近恒速位移增长期并持续至石千峰期末。二马营 期,断层最大位移突增近一倍。

3.2 北东向断裂作用带

该带指泊尔江海子断裂中的 NE 走向段落(图5 II)。断层长度和位移最大,位移剖面复杂程度最高,形成于早海西期或更早(姚宗惠等,2003;薛会 等,2009)。其演化可分三个阶段:①太原期,除东 段末端的小断层未发生连接外,其它断层均已连接 生成大型断层,最大位移点相对偏西(图 5a);②山 西期至上石盒子期,断层横向扩展并连接形成大型 断层,最大位移点在断层中部,且继承性发生(图 5b—d);③石千峰期至二马营期,断层叠覆发生硬 连接,形成现今的泊尔江海子断裂雏形(图 5e,f)。

3.3 中间调节带

该带包括三眼井断裂东段、乌兰吉林庙断裂和 泊尔江海子断裂西段(图 5 Ⅲ),在平面上呈右行左 阶展布。在晚石炭世—中三叠世期间,断层活动相 对较弱。①自西向东,断层位移逐步增大;②断层东 段受 NE 向断层强烈影响,局部位移梯度增大;③断 层西段发生构造反转。从几何样式和运动学关系分 析,该带具有构造变换带特征调节带。

4 逆冲断层位移特征

本次研究总共统计了 44 条断层的位移和长度 数据;在删除 20 条具有后期构造反转的断层后,对 24 条断层进行 D_{max}、D_{avg}、L 和 D_{max}/L 的数据类比分



```
图 6 鄂尔多斯盆地杭锦旗断裂带不同时期的 D_{\text{max}}, D_{\text{avg}}, L 和 D_{\text{max}}/L 剖面
Fig. 6 The section of D_{\text{max}}, D_{\text{avg}}, L and D_{\text{max}}/L for different evolution faults
a—独立断层; b—软连接; c—硬连接; d—断层演化后期
a—single fault; b—soft linkage; c—hard linkage; d—the late evolution of the fault
```

析(图6)。对于不同尺度的断层,一般将位移和长 度进行归一化处理,便于比较分析(董进等,2004)。 总体上,断层位移一长度剖面可以归纳为四种不同 的几何形态,代表不同的断层演化阶段(图7)。

4.1 独立断层

在断层演化初期,从断层中心到末端,独立断层 的位移从最大值变为零,且不受大型断裂带的影响 (Walsh and Watterson., 1987)。在图 7a 中,共计 12 条断层,其中 3 条为三角形位移剖面,9 条是椭圆状 位移剖面。断层长度 L 介于 2694~10053 m; D_{max} 介 于 0.73~15.81 m,而 D_{avg} 在 0.37~8.37 m; $D_{max}/L <$ 0.0025 且集中在 0.0007~0.0015(图 6,断层 1~ 12)。对比同一断层在不同时期的情况可见, D_{max} 的 位置的继承性差(图 5a、b)。剖面形态基本不受断 层长度和位移大小的影响,仅与 D_{max}/L 值相关:当 $D_{max}/L>0.001$ 时,剖面形态为三角形,但左右对称 性较差;当 $D_{max}/L<0.001$ 时,剖面形态多为椭圆形, 对称性较好。

4.2 软连接

Gupta 和 Scholz(2000)把断层不直接连接却又 在运动学上保持联系的断层组合方式称"软连接 (soft linkage)"。当断层与相邻的断层发生相互作 用时,由于应力增加,靠近相互作用端的断层位移梯 度突然变大。L从25876 m扩展至31989 m,并最终 定型 D_{max}/L;从0.001 增加至0.0046(图6,断层13 ~16)。在断层相互作用初期,受影响的断层段的位 移一长度剖面形态呈不规则的锯齿状,随后转变为 优势双峰型。在演化过程中,除双峰形态继承发展 外,D_{max}还曾发生转换事件(图7b)。

4.3 硬连接

初期发育的多条同一走向的逆冲断层经由"硬 连接"作用,断层长度突然增大,D_{max}/L 呈断崖式下 降。一般地,随着断层的演化,断层位移的增长速率 明显大于长度的增长,且主要在距离断层中心各 30%的范围内均衡发展;最大位移迁移至断层中心各 30%的范围内均衡发展;最大位移迁移至断层中部, 位移一长度剖面呈不规则波状(图 7c)。D_{max}/L 逐 步回落至0.002 附近(图 6,断层 17~22)。D_{max}既可 是继承性的,也可是在断层相互作用过程中新生的。 Peacock 和 Sanderson(1991)认为主断层位移一长度 剖面上的最小值表示两条断层在某一地史时期曾发 生连接的位置。然而,从图 5 可见,早期小断层之间 在分段连接时,其位移最小值只代表部分的"硬连 接";后期的大型断层,位移最小值才能体现两条断 层在某一地史时期发生连接的位置。





4.4 断层演化后期

石千峰期,两条不同走向的断层发生硬连接,形成现今的泊尔江海子断裂的雏形。二马营期末,该断层的长度固定在90727 m, D_{avg} 值增长至11.11 m, D_{max} 值却突增一倍(图6,断层23和24)。显然,在断层演化前中期满足 $D_{max} \approx 2D_{avg}$ (Xu Shushan et al., 2014)的关系,但在不同走向的断层连接形成大型断裂后,这种关系发生了变化。 D_{max} 显著增长,而 D_{avg} 仅有小幅度变化(图6)。在图7d中的位移一长度剖面中,这种现象也得以呈现;一些断层的位移明显增长,而另一些断层的位移却发生减小。

根据断层位移剖面的几何形态和断层发育阶段 的对比,逆冲断层的位移模式可分为4种类型:①近 对称的三角状和椭圆状,断层中部位移最大,向两端 逐渐减小直至为零,且断层的 D_{max}/L 值偏小,代表 独立断层发育阶段;②左右极不对称的锯齿状或双 峰状,D_{max}/L 值变大,说明相邻断层发生相互作用; ③不规则波型,在断层连接处位移最小,且 D_{max}/L 值偏小,代表多条小断层连接形成大型断层;④异常 尖峰型,D_{max}/L 值增大,最高接近 0.005,位移剖面 进一步复杂化,代表大型逆冲断层的后期演化阶段。

5 关于逆冲断层演化的讨论

5.1 断层演化的影响因素

将研究区的断层位移—长度数据作为一个单一数据集进行对数坐标投点, D_{max}/L 的范围在 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ (图 8)。相对而言,全球范围内的逆冲断层数据集投点, D_{max}/L 范围在 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ (Kim and



图 8 鄂尔多斯盆地杭锦旗断裂带不同时期 D_{max} —L 关系及 c 和 n 的变化趋势 Fig. 8 The relationship between D_{max} —L and the change trends of c and n in the major faults of the Hangjinqi area of the Ordos Basin in different periods

Sanderson, 2005)。断层演化剖面显示, 三眼井断裂 东段的两条断层曾多期反转(图5)。Kim 等(2001) 认为数量级降低, 可能是断裂构造反转导致断层位 移的减小或者是古断层长度的估算值大于实际值引 起的。在周缘板块相互作用下, 杭锦旗断裂带在中 侏罗世发生构造反转(区域应力场改变)(Yang Minghui et al., 2013)及早白垩世发生区域性的构造 机制变化(华北克拉通破坏)(朱日祥等, 2011), 可 以作为 D_{max}/L 偏低的影响因素。

杭锦旗断裂带的三条主断裂均经历了早期形成 并长期演化的过程,可能是不同时期的沉积、成岩和 断层作用之间耦合的结果。把不同时期断层的位 移—长度数据做线性拟合(图8),拟合线的斜率为 n(1<n<2),截距为 c。从图 8 可见,在山西期末和 下石盒子期末,c 值和 n 值曲线出现了大的波动。 其原因一是太原组、山西组为砂岩和泥岩(和煤层) 叠加的岩性组合(图2);其二是断层独立发育的时 期(图5)。而且,小尺度的断层 *D*_{max}/*L* 跨度大(图 5,断层 1—12),n 值接近 1;但同向小断层发生快速 的连接,n 值增大并趋近 2。因此,岩层能干性的突 然变化和断层演化阶段的转变可能是影响 c 和 n 值 波动的主要因素。

随着断层叠覆发展,对于不同应力场中的断层, 其末端区域的应力场发生改变(Segall and Pollard, 1980),使得断层的横向扩展被抑制, D_{max}/L 比率增 大(Peacock and Sanderson, 1991, 1996)。断层之间 在运动学上的紧密联系,派生局部应力场,使断层活 动速率更大(图7b)。在断层叠覆区内新生的断层, 将切割原始断层,并造成部分断层段的活动逐步停 止(图5虚线框)。但对于走向相同的线状断层群 (图 5, 三眼井断层西段), 独立断层之间快速连接并 新生最大的位移点, D_{max}/L虽有轻微的向下波动, 但 这是因为部分连接过程中断层位移和长度不成比例 的增加所表现的结果(Scholz et al., 1993)。而且, 对比不同走向的断层,在位移剖面上,相同走向的断 层之间并没有相互作用的明显痕迹。其原因可能是 区域应力背景决定断层发育,而断层演化阶段控制 断层之间的相互作用方式。

5.2 断层演化的路径

杭锦旗断裂带符合分段连接的断层生长模型,

其生长由断层的横向扩展、相互作用和连接组成 (Yang Minghui et al., 2013; Xu Qinghai et al., 2018)。以这种方式生长的断层将遵循一个复杂 的、阶梯状的生长路径(Cartwright et al., 1995)。地 震破裂的数据图解表明,在数据集的较低部分 $(D_{max}/L<10^{-4})$,地震破裂和断层的 D_{max}/L 比率之间 的差异已经详细研究(Manighetti et al., 2005; Ferril et al., 2008);随着断层从最初的地震破裂发展到成 熟的地质断层,无论其大小、类型和岩性如何,其 D_{max}/L 值均将从 10⁻⁵增大到 1,上限为 $D_{max} = L$ (Walsh et al., 2002)。

结合前人对断层生长路径的探讨,本文编制了 杭锦旗断裂带的演化路径简图(图9)。杭锦旗断裂 带的构造演化经历了三个阶段,即地震破裂、线性断 层(同一走向线状断层横向扩展和连接形成)到弧 形断裂带(不同走向断层连接形成)。泊尔江海子 断裂在后期演化过程中,断层积累了较多的位移,同 时能够保持近似恒定的断层长度(Walsh et al., 2002; Baudon and Cartwright, 2008)。D_{max}—L 投点 图的每一阶梯状的上升均代表断裂带发育层次的一 次转变:其中,数据点分散的程度受断层分段、连接 和反转的影响。独立断层和大型断层的 D_{max}/L 值 较高。较小尺度断层的位移和长度积聚,大规模连 接,可形成大型断层(Nicol et al., 2010),这也是造 成D_{max}/L值下降的直接原因。这一结论与前人关 于断层生长建模的研究(Cartwright et al., 1995; Nicol et al., 2010)是吻合的。断层受到后期反转影 响时,D_{max}/L值的大小和幅度都应该大于实测值,但 两者的总体趋势是一致的。

6 结论

(1)晚石炭世一中三叠世,杭锦旗断裂带在逆 冲活动过程中可分为三个条带:东西向断裂作用带, 断层晚石炭世开始发育,断层分段连接生长;北东向 断裂作用带,断层长度位移最大,位移剖面复杂;中 间调节带,断层总体活动相对较弱,但受邻区影响明 显,条带东区位移梯度异常,西区多期反转。

(2) 杭锦旗断裂带的位移模式分为4种类型, 即近对称的三角状($D_{max}/L>0.001$)和椭圆状(D_{max}/L L<0.001),对称性较好代表简单的独立断层阶段; 左右极不对称的锯齿状或双峰状, D_{max}/L 异常增大, 代表断层软连接作用阶段;不规则波型分布, D_{max}/L 呈断崖式下降,代表由多条断层连接阶段;异常尖峰 型, D_{max} 显著增长,而 D_{axx} 仅有小幅度变化,代表大型



图 9 鄂尔多斯盆地杭锦旗断裂带演化路径模式图 Fig.9 Mode of fault evolution path in the Hangjinqi area of the Ordos Basin

逆冲断层的后期演化阶段。

(3)在岩性组合、运动学和反转三个主控因素 的影响下,杭锦旗断裂带逆冲断层的演化经历了分 段生长和连接的复杂构造过程,即地震破裂、线性断 层(同一走向线状断层横向扩展和连接形成)到弧 形断裂带(不同走向断层连接形成)的三个阶段。

致谢:两位审稿专家的建设性意见使本文增色 不少,另外中国石油大学(北京)硕士研究生张宏祥 对本文的撰写提供了一定的帮助,在此一并表示感 谢!

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

- 陈全红,李文厚,胡孝林,李克永,庞军刚,郭艳琴. 2012. 鄂尔多斯盆 地晚古生代沉积岩源区构造背景及物源分析. 地质学报,86 (7):1150~1162.
- 丁国瑜. 1992. 有关活断层分段的一些问题. 中国地震,8(2):3~12.
- 董进,张世红,姜勇彪. 2004. 正断层位移—长度关系及其研究意义. 地学前缘,11(4):575~584.
- 丁燕云. 2000. 鄂尔多斯盆地北部航磁反映的构造特征. 物探与化 探,24(3):197~202.
- 冯乔,张小莉,王云鹏,樊爱萍,柳益群.2006.鄂尔多斯盆地北部上 古生界油气运聚特征及其铀成矿意义.地质学报,80(5):748~ 752.
- 纪文明,李潍莲,刘震,雷婷. 2013. 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区上 古生界气源岩分析. 天然气地球科学,24(5):905~914.
- 雷开宇,刘池洋,张龙,吴柏林,王建强,寸小妮,孙莉. 2017. 鄂尔多

斯盆地北部中生代中晚期地层碎屑锆石 U—Pb 定年与物源示踪. 地质学报,91(7):1522~1541.

- 李金涛,李恒.2015.鄂尔多斯盆地北部杭锦旗页岩气成藏条件分析. 山东工业技术,(6):92~93.
- 李潍莲,纪文明,刘震,雷婷,朱景宇. 2015. 鄂尔多斯盆地北部泊尔 江海子断裂对上古生界天然气成藏的控制. 现代地质,29(3): 584~590.
- 孙晓,李良,丁超. 2016. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区不整合结构类型 及运移特征. 石油与天然气地质,37(2):165~172.
- 孙宜朴,杨伟利,王传刚,黄宏伟,蒲泊伶. 2007. 鄂尔多斯盆地杭锦 旗地区上古生界天然气成藏历史分析. 石油天然气学报,29 (3):217~219.
- 薛会,张金川,王毅,徐波,郭华强. 2009. 鄂北杭锦旗探区构造演化 与油气关系. 大地构造与成矿学,33(2):206~214.
- 谢润成,周文,李良,苏瑗,王辛. 2010. 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地 区上古生界砂岩储层特征. 新疆地质,28(1):86~90.
- 姚宗惠,张明山,曾令邦,王润生,何天翼. 2003. 鄂尔多斯盆地北部 断裂分析. 石油勘探与开发,30(2);20~23.
- 朱日祥,陈凌,吴福元,刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围 与机制. 中国科学:地球科学,41(5):583~592.
- 张少华,杨明慧,罗晓华.2015.断裂带油气幕式运移:来自物理模拟 实验的启示.地质论评,61(5):1183~1191.
- 郑喜强,严岗.2006.鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区油气圈闭类型研 究.勘探地球物理进展,29(4):279~284.
- Ackermann R V, Schlische R W, Withjack M O. 2001. The geometric and statistical evolution of normal fault systems: an experimental study of the effects of mechanical layer thickness on scaling laws. Journal of Structural Geology, 23(11): 1803~1819.
- Anders M H, Schlische R W. 1994. Overlapping faults, intrabasin highs, and the growth of normal faults. Journal of Geology, 102(2): 165~ 179.
- Baudon C, Cartwright J. 2008. The kinematics of reactivation of normal faults using high resolution throw mapping. Journal of Structural Geology, 30(8): 1072~1084.
- Bergen K J, Shaw J H. 2010. Displacement profiles and displacement length scaling relationships of thrust faults constrained by seismicreflection data. Geological Society of America Bulletin, 122(7~8): 1209~1219.
- Cartwright J A, Trudgill B D, Mansfield C S. 1995. Fault growth by segment linkage: an explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the Canyonlands Grabens of SE Utah. Journal of Structural Geology, 17(9): 1319~1326.
- Chen Quanhong, Li Wenhou, Hu Xiaolin, Li Keyong, Pang Jungang, Guo Yanqin. 2012&. Tectonic setting and provenance analysis of late Paleozoic sedimentary rocks in the Ordos Basin. Acta Geologica Sinica, 86(7): 1150~1162.
- Cowie P A, Scholz C H. 1992a. Displacement—length scaling relationship for faults: data synthesis and discussion. Journal of Structural Geology, 14(10): 1149~1156.
- Cowie P A, Scholz C H. 1992b. Physical explanation for the displacement—length relationship of faults using a post-yield fracture mechanics model. Journal of Structural Geology, 14(10): 1133 ~ 1148.
- Cowie P A. 1998. A healing—reloading feedback control on the growth rate of seismogenic faults. Journal of Structural Geology, 20(8): 1075~1087.
- Darby B J, Ritts B D. 2002. Mesozoic contractional deformation in the middle of the Asian tectonic collage: the intraplate Western Ordos

fold—thrust belt, China. Earth & Planetary Science Letters, 205 (1):13~24.

- Dawers N H, Anders M H, Scholz C H. 1993. Growth of normal faults: displacement—length scaling. Geology, 21(12): 1107.
- Davis G A, Darby B J. 2010. Early Cretaceous overprinting of the Mesozoic Daqing Shan fold-and-thrust belt by the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. Geoscience Frontiers, 1(1):1~20.
- Davis K, Burbank D W, Fisher D, Wallace S, Nobes D. 2005. Thrust fault growth and segment linkage in the active ostler fault zone, New Zealand. Journal of Structural Geology, 27(8): 1528~1546.
- Ding Guoyu. 1992&. Some discussions on fault segmentation. Earthquake Research in China, 8(2): 3~12.
- Ding Yanyun. 2000&. Structural characteristics of northern Ordos Basin reflected by aeromagnetic data. Geophysical & Geochemical Exploration, 24(3): 197~584.
- Dong Jin, Zhang Shihong, Jiang Yongbiao. 2004&. The displacement length relationship of faults and its significance. Earth Science Frontiers, 11(4): 575~584.
- Faure M, Lin W, Chen Y. 2012. Is the Jurassic (Yanshanian) intraplate tectonics of North China due to westward indentation of the North China block? Terra Nova, 24(6):456~466.
- Feng Qiao, Zhang Xiaoli, Wang Yunping, Fan Aiping, Liu Yiqun. 2006&. Characteristics of migration and accumulation of hydrocarbon and its deposit-forming signification in upper Paleozoic in north Ordos Basin. Acta Geologica Sinica, 80(5): 748~752.
- Ferrill D A, Smart K J, Necsoiu M. 2008.Displacement—length scaling for single-event fault ruptures: Insights from Newberry Springs Fault Zone and implications for fault zone structure. Geological Society London Special Publications, 299(1): 113~122.
- Gupta A, Scholz C H. 2000. A model of normal fault interaction based on observations and theory. Journal of Structural Geology, 22(7): 865 ~879.
- Gupta S, Cowie P A, Dawers N H, Underhill J R. 1998. A mechanism to explain rift-basin subsidence and stratigraphic patterns through fault—array evolution. Geology, 26(7): 595~598.
- Jackson J, Leeder M. 1994. Drainage systems and the development of normal faults: an example from Pleasant Valley, Nevada. Journal of Structural Geology, 16(8): 1041~1059.
- Ji Wenming, Li Weilian, Liu zhen, Lei Ting. 2013&. Research on the upper Paleozoic gas source of the Hangjiqing Block in the northerm Ordos Basin. Natural Gas Geoscience, 24(5): 905~914.
- Kim Y S, Andrews J R, Sanderson D J. 2001. Reactivated strike-slip faults: examples from north Cornwall, UK. Tectonophysics, 340 (3): 173~194.
- Kim Y S, Sanderson D J. 2005. The relationship between displacement and length of faults: a review. Earth Science Reviews, 68(3): 317 ~334.
- Lei Kaiyu, Liu Chiyang, Zhang Long, Wu Bolin, Wang Jianqiang, Cun Xiaoni, Sun Li. 2017&. Detrital zircon U-Pb dating of middle—late Mesozoic strata in the northern Ordos Basin: Implications for tracing sediment sources. Acta Geologica Sinica, 91(7): 1552~1541.
- Li Jintao, Li Heng. 2015#. Analysis of shale gas accumulation conditions in Hangjinqi, northern Ordos Basin. Shandong Industrial Technology, (6): 92~93.
- Li Weilian, Ji Wenming, Liu Zhen, Lei Ting, Zhu Jingyu. 2015&. Control of Boerjianghaizi fault on gas accumulation of upper Paleozoic in northern Ordos Basin. Geoscience, 29(3): 584~590.

- Liu Shaofeng, Su San, Zhang Guowei. 2013. Early Mesozoic basin development in North China: Indications of cratonic deformation. Journal of Asian Earth Sciences, 62: 221~236.
- Manighetti I, Campillo M, Sammis C, Mai P M, King G. 2005. Evidence for self-similar, triangular slip distributions on earthquakes: implications for earthquake and fault mechanics. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 110(B5).
- Marrett R, Allmendinger R W. 1991. Estimates of strain due to brittle faulting: sampling of fault populations. Journal of Structural Geology, 13(6): 735~738.
- Nicol A, Walsh J J, Villamor P, Seebeck H, Berryman K R. 2010. Normal fault interactions, paleoearthquakes and growth in an active rift. Journal of Structural Geology, 32(8): 1101~1113.
- Peacock D C P, Sanderson D J. 1991. Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones. Journal of Structural Geology, 13(6): 721~733.
- Peacock D C P, Sanderson D J. 1996. Effects of propagation rate on displacement variations along faults. Journal of Structural Geology, 18(2~3): 311~320.
- Ritts B D, Hanson A D, Darby B J, Nanson L, Berry A. 2004. Sedimentary record of Triassic intraplate extension in North China: evidence from the nonmarine NW Ordos Basin, Helan Shan and Zhuozi Shan. Tectonophysics, 386(3):177~202.
- Schlische R W, Young S S, Ackermann R V, Gupta A. 1996. Geometry and scaling relations of a population of very small rift-related normal faults. Geology, 24(8): 683~686.
- Scholz C H, Dawers N H, Yu J Z, Anders M H, Cowie P A. 1993. Fault growth and fault scaling laws: Preliminary results. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 98(B12); 21951~21961.
- Schultz R A, Soliva R, Fossen H, Okubo C H, Reeves D M. 2008. Dependence of displacement-length scaling relations for fractures and deformation bands on the volumetric changes across them. Journal of Structural Geology, 30(11): 1405~1411.
- Segall P, Pollard D D. 1980. Mechanics of discontinuous faults. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 85(B8); 4337~4350.
- Sun Xiao, Li Liang, Ding Chao. 2016&. Unconformity structure types and hydrocarbon migration characteristics in Hangjinqi area of Ordos Basin. Oil & Gas Geology, 37(2): 165~172.
- Sun Yipu, Yang Weili, Wang Chuangang, Huang Hongwei, Pu Boling. 2007&. Analysis of accumulation history of upper Paleozoic gas in Hangjinqi area of Ordos Basin. Journal of Oil and Gas Technology, 29(3): 217~219.
- Torabi A, Berg S S. 2011. Scaling of fault attributes: a review. Marine and Petroleum Geology, 28(8):1444~1460.
- Walsh J J, Watterson J. 1987. Distributions of cumulative displacement and seismic slip on a single normal fault surface. Journal of Structural Geology, 9(8): 1039~1046.
- Walsh J J, Watterson J. 1988. Analysis of the relationship between displacements and dimensions of faults. Journal of Structural Geology, 10(3): 239~247.
- Walsh J J, Nicol A, Childs C. 2002. An alternative model for the growth

of faults. Journal of Structural Geology, 24(11): 1669~1675.

- Watterson J. 1986. Fault dimensions, displacements and growth. Pure and Applied Geophysics, 124(1): 365~373.
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seism. Soc. Am., 84(4): 974~1002.
- Xie Runcheng, Zhou Wen, Li Liang, Su Yuan, Wang Xin. 2010&. Characteristics of upper Paleozoic sandstone reservoir in Hangjinqi area of Ordos Basin. Xinjiang Geology, 28(1): 86~90.
- Xu Qinghai, Shi Wangzhong, Xie Xiangyang, Arthur B B, Xu Litao, Wu Rui, Liu Kai. 2018. Inversion and propagation of the Late Paleozoic Porjianghaizi fault (North Ordos Basin, China): Controls on sedimentation and gas accumulations. Marine & Petroleum Geology, 91:706~722.
- Xu Shushan, Nieto-Samaniego A F, Alaniz- lvarez S A. 2014. Estimation of average to maximum displacement ratio by using fault displacement—distance profiles. Tectonophysics, 636: 190~200.
- Xu Shushan, Nieto-Samaniego A F, Murillo-Mu etón G, Alanizlvarez S A, Grajales-Nishimura J M, Velasquillo-Martinez L G. 2016. Effects of physical processes and sampling resolution on fault displacement versus length scaling: the case of the Cantarell complex oilfield, gulf of Mexico. Pure & Applied Geophysics, 173 (4): 1125~1142.
- Xue Hui, Zhang Jinchuan, Wang Yi, Xu Bo, Guo Huaqiang. 2009&. Relationship between tectonic evolution and hydrocarbon in Hangjinqi block of north Ordos Basin. Geotectonica et Metallogenia, 33(2): 206~214.
- Yang Minghui, Li Liang, Zhou Jin, Qu Xiaoyan, Zhou Duo. 2013. Segmentation and inversion of the Hangjinqi fault zone, the northerm Ordos basin (North China). Journal of Asian Earth Sciences, 70~ 71: 64~78.
- Yang Minghui, Li Liang, Zhou Jin, Jia Huichong, Sun Xiao, Qu Xiaoyan, Zhou Duo, Gong Ting, Ding Chao. 2015. Mesozoic structural evolution of the Hangjinqi area in the northern Ordos Basin, North China. Marine and Petroleum Geology, 66: 695~710.
- Yao Zhonghui, Zhang Mingshan, Zeng Lingbang, Wang Runsheng, He Tianyi. 2003&. Analysis of the faults in the northern Ordos Basin, northwest China. Petroleum Exploration and Development, 30(2): 20~23.
- Zhang Kaijun. 2012. Destruction of the North China Craton: Lithosphere folding-induced removal of lithospheric mantle? Journal of Geodynamics, 53(53): 8~17.
- Zhang Shaohua, Yang Minghui, Luo Xiaohua. 2015&. Hydrocarbon episodic migration in fault zones: Insights from physical simulation experiments. Geological Review, 61(5): 1183~1191.
- Zhen Xiqiang, Yan Gang. 2006&. Types of hydrocarbon traps in Hangjinqi area of northern Ordos Basin. Progress in Exploration Geophysics, 29(4): 279~284.
- Zhu Rixiang, Chen Ling, Wu Fuyuan, Liu Junlai. 2011#. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton. Scientia China: Earth Sciences, 54(5): 583 - 592.

Analysis of displacement—length relationship of reverse faults: a case study of Hangjinqi fault zone

LI Shulin¹⁾, LI Liang²⁾, JIA Huichong²⁾, ZHANG Wei²⁾, XU Hengyi¹⁾, YANG Minghui^{1,3)}

1) College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing, 102249;

2) North China Company, SINOPEC, Zhengzhou, 450006;

3) State Key Laboratory of Prtroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing, 102249

Objectives: Based on the investigation of the formation and evolution of the Hangjinqi fault zone in the northern Ordos Basin, this paper discusses the displacement evolution characteristics and influencing factors of the fault zone from the Late Carboniferous to the Middle Triassic through the fault displacement—length relationship study.

Methods: Through a series of seismic section interpretations, throw and dip angles of these faults are measured. Through the stratum recovery analysis, the displacement along the faults in different periods and the location of the ancient fault tips are approximately calculated, the history of fault growth connections is determined, and the displacement—length relationships in the evolution of the reverse faults is analyzed.

Results: The evolution of the Hangjinqi fault zone is controlled by the basement faults. Among them, the NEtrending fault zone evolved earlier, mainly in the form of displacement growth. The soft linkage between the fault tip and the overlying fault zone resulted in an increase of local displacement and eventually a hard linkage. the EWtrending fault zone developed in the later stage. The fault segmentation, lateral propagation, and connection process are involved; the fracture activity in the central adjustment zone is relatively weak and locally reversed.

Conclusion: We find that the evolution zoning characteristics of the Hangjinqi fault zone from the Late Carboniferous to the Middle Triassic include: the east—west basement fault zone, the northeast basement fault zone, and the intermediate adjustment zone. Based on the geometry of the fault displacement—length profile and the analysis of the fault evolution stage, four types of reverse fault displacement patterns can be simply classified: (1) Nearly symmetric triangles and ellipses, representing a single fault; (2) The left—right asymmetric zigzag or double peaks, representing soft linkage between faults; (3) Irregular wavy, reflecting the connection of multiple faults; (4) Abnormal peaks, representing late displacement adjustment of large thrust fault zones. Furthermore, the evolution of the Hangjinqi fault zone has experienced a complex process of fault growth and connection. As the evolution of the fault zone, the ratio of the maximum displacement to the length of the fault will change. Compared with the stage of fault connection, the D_{max}/L of the soft connection and the connected mature fault will be higher, but the overall trend is increasing.

Keywords: reverse fault; ancient fault throw; The propagation and linkage of fault; displacement—length relationship; displacement pattern; Hangjinqi fault zone; Ordos Basin

Acknowledgements: This study was finally supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41172127,41572102)

First author: LI Shulin, male, born in 1994. postgraduate, mainly engaged in structural geology, Email: 1037584980@ qq.com

Corresponding author: YANG Minghui, male, born in 1962. Ph. D., professor, Mainly engaged in the teaching and research of basin structure analysis, Email: yangmh@cup.edu.cn

Manuscript received on: 2018-07-18; Accepted on: 2019-01-09; Edited by: LIU Zhiqiang **Doi**: 10.16509/j.georeview.2019.02.003