济阳坳陷惠民凹陷夏口断裂带的分段性及其成因机制

王迪[1)],吴智平[1,2)],李伟[1)],刘华[3)],李趁义[3)],张耀[1)]
1) 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛,266580;
2) 青岛海洋科学与技术国家实验室,山东青岛,266235;
3) 中石化有限公司胜利油田分公司,山东东营,257015

内容提要:本文运用丰富的三维地震资料,通过对夏口断裂带几何学特征及其生长过程分析,揭示了其发育演化的分段性和阶段性,并就成因机制进行了探讨。结果表明:夏口断裂带是由NE走向与EW走向交替出现的4个分段连接而成的锯齿状断裂带,受区域地质背景及断裂发育的力学机制控制,其演化过程可划分为4个阶段;孔店组沉积期仅NE向的第一、三(西段)、四段活动,EW向的第二段、第三段的东段尚未开始活动,整个夏口断裂带处于分段独立发育阶段,尚未整体连接;沙四段沉积期随着区域拉张应力开始由NW—SE向近S—N向的转变,先期NE向断层段持续活动,且在侧接带位置形成的转换斜坡上开始发育近EW向断层段,各NE向断层段间发生软连接;沙三段沉积期在近S—N向的强烈拉张作用下,夏口断裂带发生硬连接,不同走向的各分段断层连接成一整体,形成NE向与EW向交替出现的锯齿形断裂带;沙二段到东营组沉积期为走滑改造作用阶段,在夏口断裂带不同位置发育有帚状构造、走滑双重构造,并在断裂带不同的弯曲段走滑派生出局部的拉张或挤压,体现了拉张背景下的走滑叠加效应。夏口断裂带发育演化的时空差异对于该地区沉降中心、物源通道的分布具有重要的控制作用。

关键词:夏口断裂带,分段发育,成因机制,惠民凹陷

大量研究表明,断陷盆地内部大尺度伸展断裂的发育具有明显的分段性,其通常由多个走向、位移存在差异的小尺度断层段组成,不同的断层段具有相对独立的运动学特征(Anders and Schlische, 1994;Faulds and Stewart, 1998),断裂发育早期各断层段孤立伸展,而后经历各断层段间的相互作用阶段,通过软连接或硬连接的方式,最终连接成一条长度几十至上百千米、平面上呈锯齿状等样式的大尺度断层(Dawers and Anders, 1995; Schlische and Anders, 1996; Fossen, 1997; Kim et al., 2004; Frankowicz and McClay, 2010; Fossen and Rotevatn, 2016;孙思敏等,2016)。断层的这种分段生长特征体现了多期构造运动的叠加效应,各分段不仅存在几何学特征、运动学特征的差异,也反映了区域及局部应力场差异,因此研究断层分段生长特征对认识区域应力变化、盆地演化过程以及油气勘探具有重要意义(孙思敏等,2003;Jackson et al., 2005;王有功等,2014;田巍等,2015;徐长贵,2016;吴智平等,2016)。

夏口断裂带发育于渤海湾盆地济阳坳陷的惠民凹陷,为临南洼陷的南部边界断层(图1),整体呈NEE向展布,平面上表现为锯齿状,具有明显的分段性(倪金龙等,2011),前人对其研究主要集中在断裂体系组合特征、断层发育对油气运移、分布及沉积中心迁移的控制作用等方面(赵密福等,2000;高先志等,2003;张小莉等,2008;林玉祥等,2016;赵利和李理,2017),就夏口断层的分段性而言,目前还鲜有研究。本文运用最新的高精度三维地震资料,从几何学、运动学两方面揭示了夏口断层的分段发育特征,建立了其形成演化模式,探讨了其成因机制,这不仅可为认识断裂带的发育演化过程及机理提供理论借鉴,也可为该地区油气勘探实践提供指

注:本文为国家重大专项(编号:2016ZX05006-007-001)和中石化重大科技攻关项目(编号:30200018-17-ZC0613-0019)的成果。
收稿日期:2018-03-23;改回日期:2018-09-11;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.06.004
作者简介:王迪,男,1989年生,博士研究生,含油气盆地构造解析专业,Email:jerry-di@163.com。通讯作者:吴智平,男,1967年生,教授,主要从事含油气盆地构造及其控藏作用研究。Email:wuzp@upc.edu.cn。

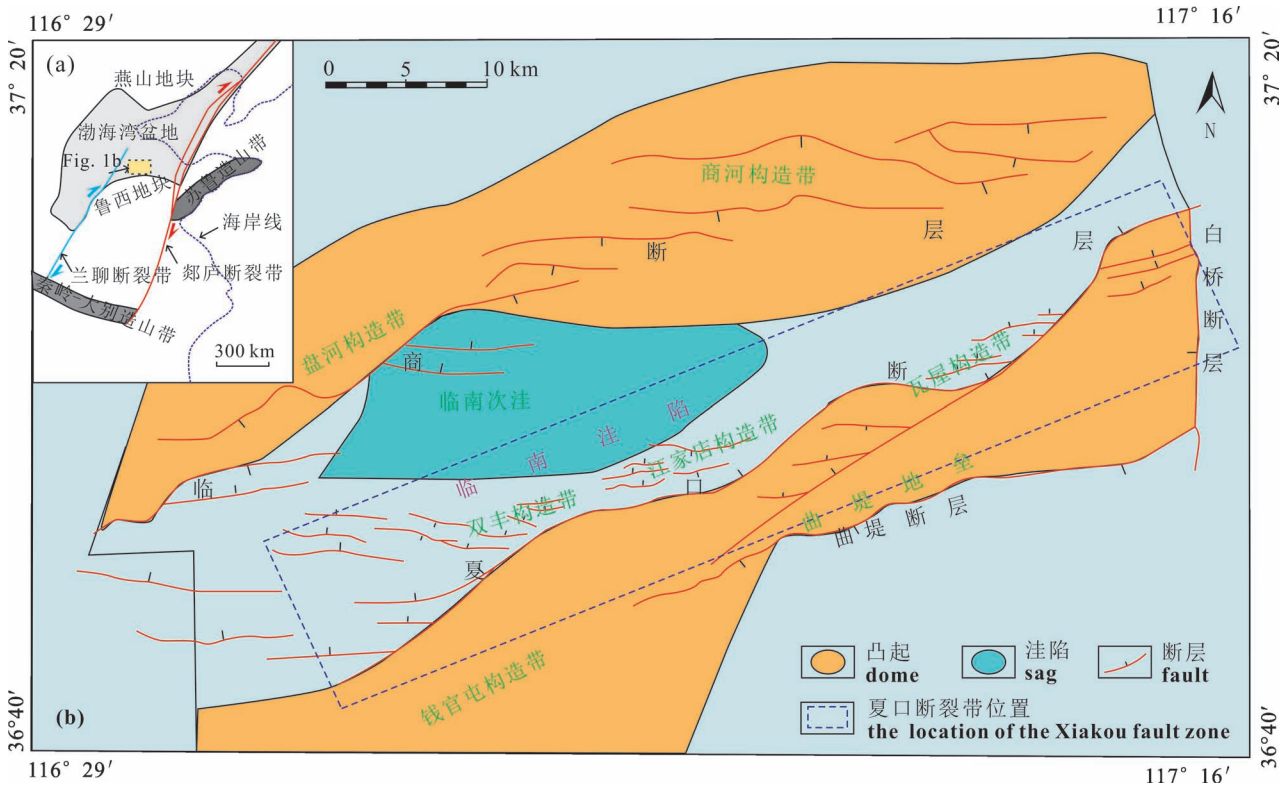


图 1 渤海湾盆地临南洼陷构造简图

Fig. 1 Simplified structural map of the Linnan Sag, Bohai Bay Basin

导。

1　夏口断裂几何学特征的分段性

夏口断裂带整体呈 NEE 走向,但并不平直,表现出明显的锯齿状,具有 NE 走向与近 EW 走向交替出现的特点,且不同段的主断裂与次级断裂的组合关系及内部结构发育也存在差异;运用研究区丰富的三维地震资料以及测井资料,通过对夏口断裂带不同位置的平面、剖面特征的差异性分析,可将其划分为 4 段(图 2)。

第一段表现为由 NE 向的主断裂与近 EW 向次级断裂组合的成帚状体系,在剖面上主断层呈板式,和次级断裂形成同向 Y 字型组合,表现出明显的走滑特征(图 3a、b);第二段主断裂为近 EW 向,次级

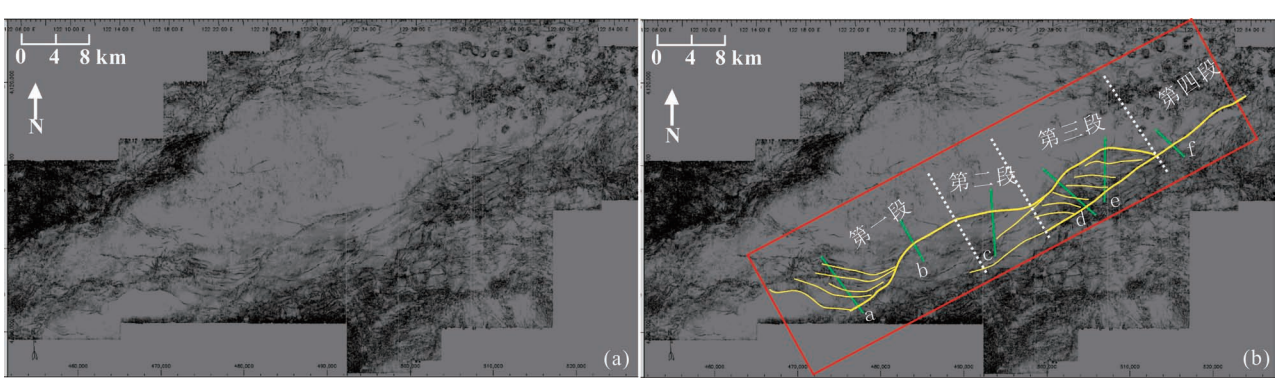


图 2 水平相干切面所揭示的夏口断裂带分段性:(a) 1500 ms 水平相干切面;
(b) 不同段的断裂平面组合差异及测线位置)

Fig. 2 Segmentation of the Xiakou fault zone revealed by time coherent slice: (a) time coherent slice(1500ms);
(b) the difference of fracture plane combinations and the location of different profile lines)

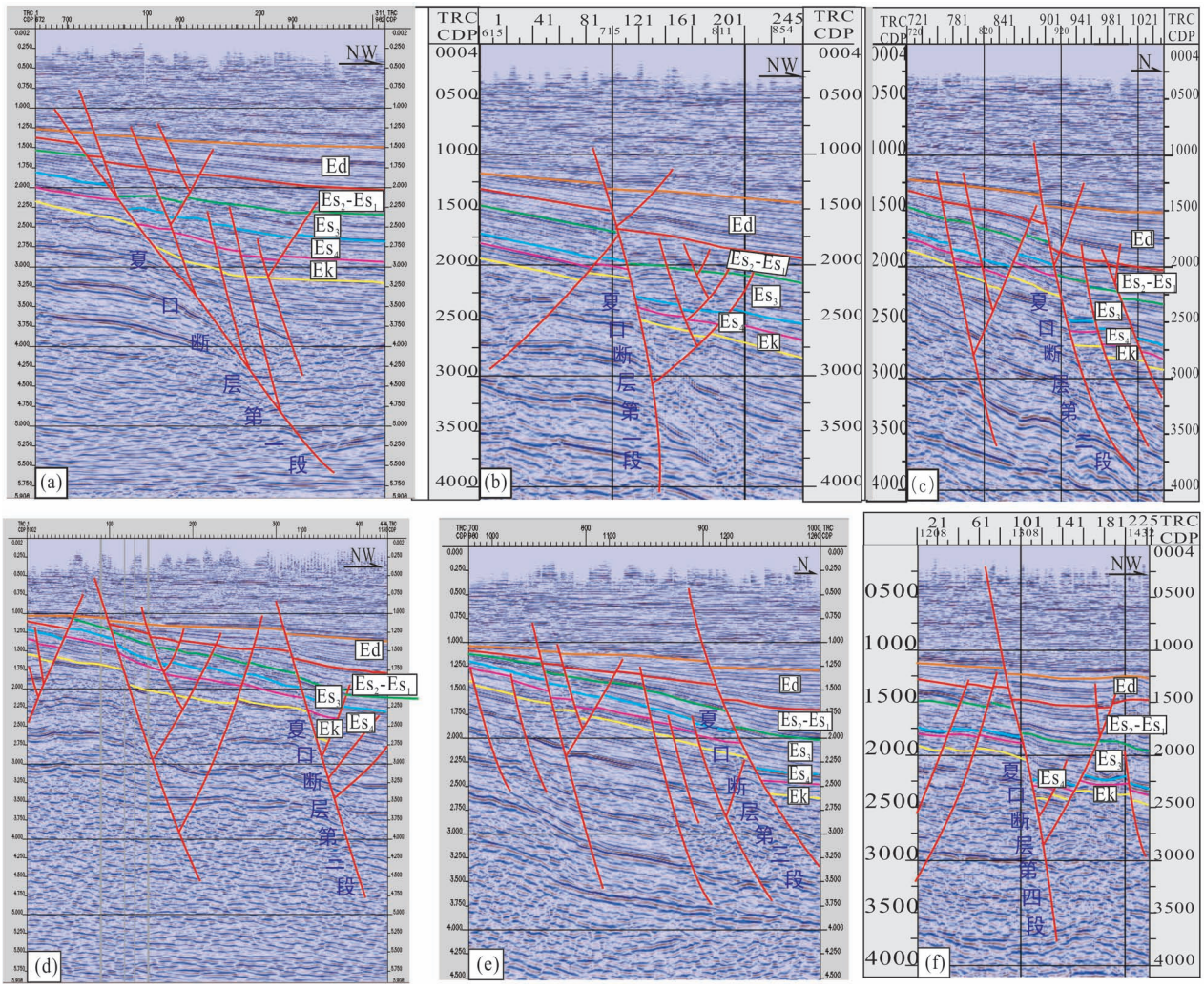


图 3 夏口断裂带不同位置剖面特征(测线位置见图 2b)

Fig. 3 Characteristics of different positions in Xiakou fault zone(profile position see Fig. 2b)

断裂较少,其南侧存在自东侧延伸而来的两条 NE 向断裂,但控制作用较弱,剖面上主断层呈铲式,次级断层与主断层组合成阶梯状(图 3c);第三段表现为两条 NE 向断裂所围限的由多条近 EW 向次级断裂所构成的"叠瓦扇",剖面上两 NE 向主干断层与次级断层组合成反向 Y 字型(图 3d),主干断层东侧 EW 向次级断裂和主断层呈阶梯状(图 3e);第四段主断裂为 NE 走向,次级断裂较少,剖面上主断层倾角较陡,与次级断裂表现为反向 Y 字型组合(图 3f)。

断裂带不仅在其走向、剖面上存在差异性,断裂带内部结构特征也存在明显差异性(陈伟等,2010)。前人(吴智平等,2010)通过测井曲线对夏口断裂带内部结构特征研究认为,夏口断裂带内部结构特征存在明显差异性,垂向上具有分层性、横向上具有分带性以及走向上的分段性,这也证明了夏口断裂带存在明显的分段特征。

2 夏口断裂生长发育的阶段性

作为临南凹陷的南部边界断层,夏口断层不是一次形成,而是经历了多期次的发育演化过程,其现今几何学特征的分段性体现了各构造阶段发育特征的叠合效应。

夏口断裂带演化过程中主要受到拉伸作用,不同时期断层垂直落差可以反应断层活动强弱。因此,文章中使用夏口断裂带垂直落差近似代表断层位移量。其计算公式为 $D=H_u—H_f$,式中 H_u 为上盘地层厚度,H_f 代表下盘地层厚度,此次在高精度三维地震精细解释基础上,以每 20 道(约 500 m)一条地震剖面的密度选取了 120 条垂直于夏口断层各走向

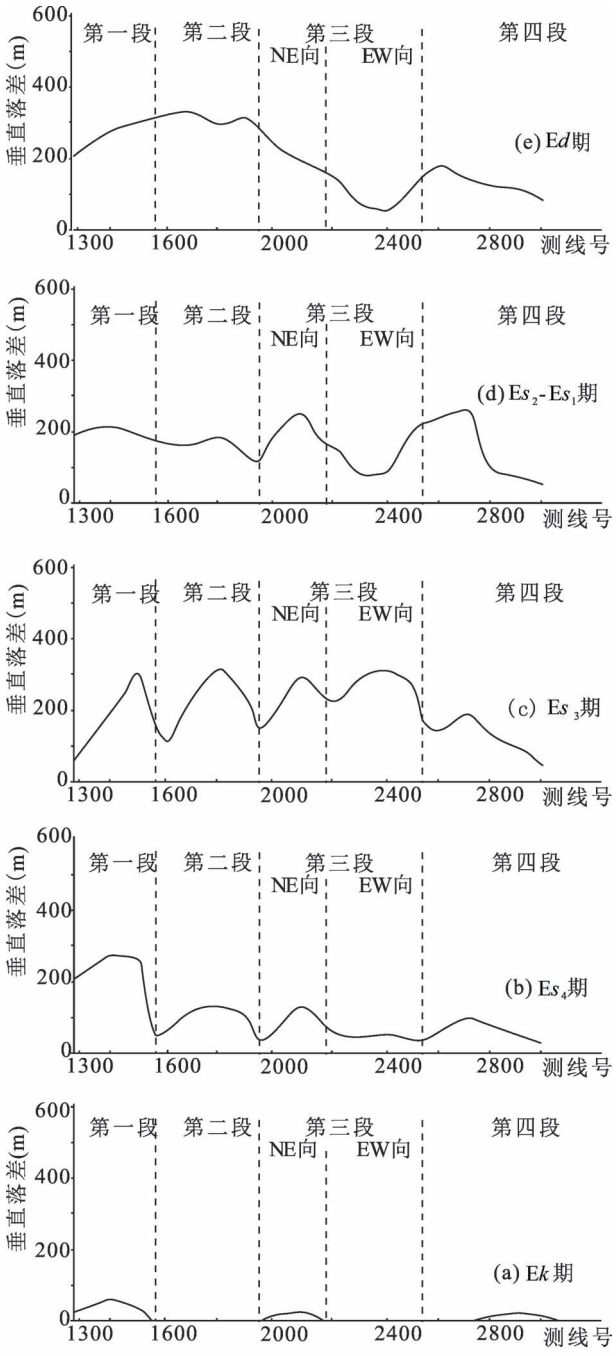


图 4 夏口断裂带不同段的主断层各阶段垂直位移量

Fig. 4 Distribution of verticle displacement of Xiakou fault zone

段的地震剖面,求得了夏口断裂带 Ek、Es_4、Es_3、Es_2—Es_1以及 Ed 期的垂直落差,用来表征夏口断裂带不同时期、不同段的活动强度(图 4)。

孔店组(Ek)沉积期:该时期为夏口断裂带初始发育期,整体活动强度小,垂直落差不超过 100 m,且仅 NE 向的第一、三(西段)、四段活动,具有"西强东弱"的特点;该时期 EW 向的第二段、第三段的东段尚未开始活动,整个夏口断裂带处于分段独立发育阶段,尚未整体连接(图 4a)。

沙四段(Es_4)沉积期:NE 向各段持续活动,且活动强度有所增大;近 EW 向各段此时开始活动,但活动强度明显要弱于相邻的 NE 向段;此时夏口断裂带各分段开始逐步连接,整体活动强度依然表现为"西强东弱"(图 4b)。

沙三段(Es_3)沉积期:夏口断裂带的活动强度大,最大垂直落差可达 300m;尽管该时期夏口断裂带的各分段已连接在一起,但不同位置的垂直落差存在差异,在各段的连接部位明显要小于各段的中部(图 4c)。

值得指出是,该时期是临南洼陷的主要裂陷沉降期,夏口断裂带不同位置断层落差的差异性对临南洼陷该时期沉降中心的展布及物源通道的位置具有重要的控制作用(图 5)。由于各断层段中部的垂直落差明显大于两侧,因而在其对应的下降盘位置通常成为沉降中心,沿夏口断裂带呈串珠状排列;而在各断层段侧接相连的位置由于垂向落差小,在其对应的下降盘位置往往成为低凸起,在其对应的上升盘则成为有利的物源通道。该时期沉积过程中,第一段和第二段、第二段和第三段连接处表现为横向背斜,成为下盘物源区碎屑物质进入临南洼陷主要通道,而第三段和第四段转换斜坡处成为下盘碎屑物质进入临南洼陷的主要通道,同时转换斜坡处地形更平缓,物源运移距离更长,在沉积期向湖盆推进更远,在各断层段连接处下降盘发育大型三角洲平原;而在断层活动强烈的断层中部,构造沉降大,常以深湖—半深湖泥岩沉积为主(图 5)。因此,夏口断裂带上盘各断层段中央最大位移处往往是洼陷内主要烃源岩分布区;而各断层段连接处邻近生烃中心,常常是有利的油气运移区。这一现象前人在对东濮凹陷地区正断层位移—长度关系研究中也得到了证实(孙思敏等,2003)。

沙二段—沙一段(Es_2—Es_1)沉积期:该时期夏口断裂带各分段已完全连接,整体垂向活动强度有所减弱,各分段的活动性差异也明显减小,只有第二段与第三段的连接处及第三段 EW 走向的东段相对较小(图 4d)。该时期除了主干断层发育外,西侧第一段 NE 向主断层的尾端开始发育近 EW 向次级断裂,形成帚状组合;在第三段与第四段的侧接部位发育近 EW 向的次级断层,形成走滑双重构造;这体现了该时期在拉张背景下明显叠加有走滑效应。

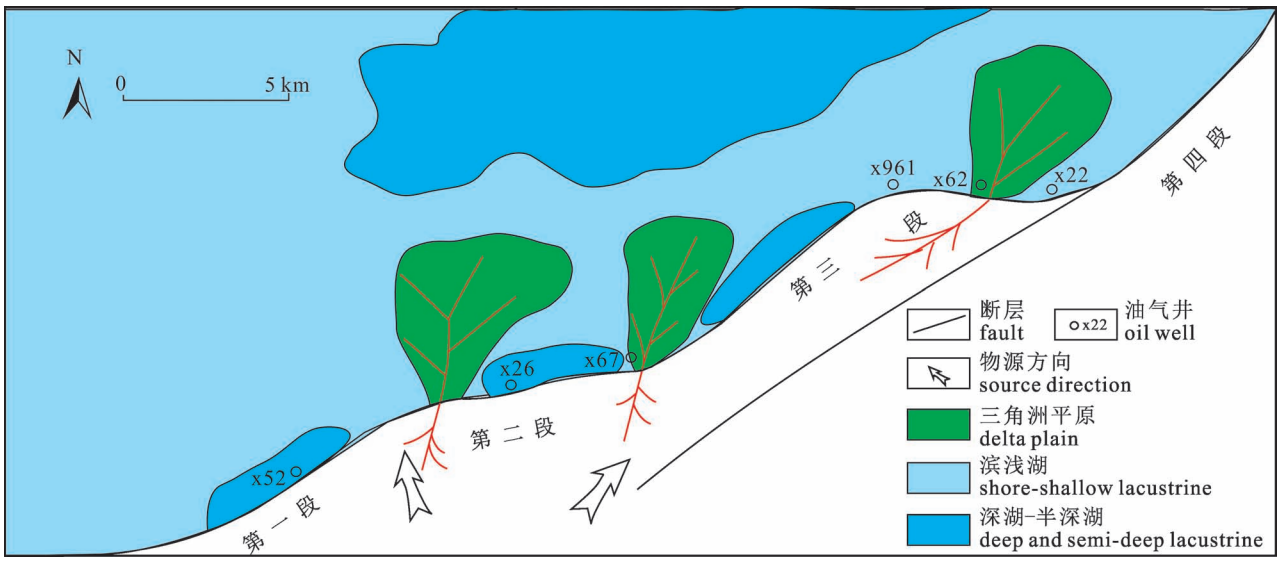


图 5 夏口断裂带各分段活动强度差异性对沉降中心及物源通道的控制(以 Es_3 沉积期为例)

Fig. 5 Control of settlement center and source channel by the different activity intensity of each segment of the Xiakou fault zone (the Es_3 period as an example)

东营组(E*d*)沉积期:该时期夏口断裂的发育体现了对前期特征的延续,但整体活动强度有所增大,第三段 EW 走向东段的垂直落差明显偏小,沉降中心位于第二段的下降盘(图 4e)。

上述断层活动性表明,夏口断层的发育演化经历了分段发育生长到整体连接生长的转变过程,各 NE 向段要先于 EW 向段发育,不同段、同一段的中部与两侧的活动强度也有所不同,体现了夏口断裂发育演化的时空差异。

3 夏口断裂演化的模式及机制探讨

20 世纪 80 年代以来,国内外地质学家注意到大尺度正断层表现出分段性,即大尺度正断层通常由多个不同走向、不同位移的小尺度断层段组成,这些不同断层段具有相对独立的运动学特征(Anders and Schlische, 1994; Faulds and Stewart, 1998)。国内外学者通过大量的实例研究,提出了正断层生长模式(多断层连接模式)(Barnett et al., 1987; Schlische and Anders, 1996; Kim et al., 2004; Fossen and Rotevatn, 2016; Frank et al., 2016; 阙晓铭, 2013; 孙思敏等, 2016)。

作为临南洼陷的主控边界断裂,夏口断裂带的发育受控于太平洋板块俯冲以及郯庐断裂带的活动(吴智平等, 2003; 任建业等, 2009; 颜世永等, 2010; 李三忠等, 2010)等大的区域地质背景,其区别于典型的正断层生长模式,在发育过程中还叠加有走滑作用。依据夏口断裂带几何学特征的分段性及其生长发育的阶段性,可将其演化过程或分为 E*k* 期独立生长、Es_4 期软连接、Es_3 期硬连接以及 Es_2—E*d* 期走滑改造 4 个阶段(图 6)。

E*k* 期的独立生长阶段:该时期临南洼陷所在的济阳坳陷乃至整个渤海湾盆地处于初始裂陷阶段,处于 NW 向拉张背景下(侯贵廷等, 2001; 郭兴伟等, 2009),夏口断裂带 NE 向的第一、三、四段开始发育,活动性相对较弱,处于各段独立生长阶段,尚未连接;此外,前人在惠民凹陷南斜坡地区识别出了一系列近 SN(或 NNW)向基底断层(刘冠德等, 2007; 任建业等, 2009; 倪金龙等, 2011),在基底断层分割作用下,早期发育的 NE 向断层在基底断层处终止活动,这也是造成各 NE 向段断层独立生长的重要因素(图 6a)。

Es_4 期的软连接阶段:该时期兰聊断裂由左旋转变为右旋,同时太平洋板块向欧亚板块俯冲方向及速度发生变化,区域拉张应力场发生改变,由 NW—SE 向拉张,转变为近 S—N 向拉张(侯贵廷等, 1998; 吴智平等, 2004; 任建业等, 2009)。夏口断裂带先期发育的 NE 向的第一、三、四段发生斜向拉伸,继续发育,各断层段受应力增加沿走向相互接近,随着各断层段相互接近发生叠覆,继而发生相互作用,断层长度增加速度下降,同时第一段与第三

段、第三段与第四段发生软连接,在相邻段的侧接部位形成转换斜坡。此时区域应力场保持稳定,叠覆断层段应力场发生改变影响了转换斜坡断层发育,两侧 NE 向断层生长减慢,在此基础上近 EW 向的第二段及第三段的东段开始发育,调节两侧断层位移(图 6b)。

Es_3期的硬连接阶段:该时期是济阳坳陷强烈断陷期,近 SN 向的区域拉伸应力场起到主导作用(夏斌等,2006;张小莉等,2008),在 NE 向断层段持续斜向伸展的同时,EW 向断层段强烈活动,各走向断层段末端相互作用强烈,使得叠覆区应力集中,当应力累计强度超过某一临界值,叠覆区发生脆性变形,开始生成次级断层并发生断层的合并(Gupta and Scholz, 2000;Morley et al., 2004;顾玉超和戴俊生,2015),完成由软连接到硬连接的转变,夏口断裂自西向东连接,成为一条锯齿状的大断层(图 6c)。

Es_2—Ed 期的走滑改造阶段:该时期整个济阳坳陷的伸展作用有所减弱(刘朝露和夏斌,2007),但郯庐断裂右旋走滑强烈,加之夏口断裂带南部鲁西隆起的砥柱作用,导致济阳坳陷西部地区向东挤出旋扭,夏口断裂带发生强烈右旋走滑(侯贵廷等,1998;池英柳和赵文智,2000)。在此作用下,夏口断裂带 NE 向的第一段西端产生一系列 NWW 近 EW 向次级断裂,与主干断层组合成帚状构造样式;而第三段的西段与第四段属于属于右旋右阶,在其侧接部位派生出 NE 向局部拉张应力场,产生近 EW 向次级断裂,导致走滑双重构造的形成(图 6e);此外,弯曲的断层在走滑过程中,不同的弯曲段会形成局部的增压区或释压区(吴智平等,2016),由于先期夏口断裂带表现为一条由 NE 向段和 EW 向段交替组成的锯齿状弯曲断裂,在右旋走滑条件下,NE 向段为增压区,EW 向段为释压区。因而该时期夏口断裂带的发育特征体现了锯齿状拉张断裂被强烈走滑作用所改造的效应。本文通过对夏口断裂带近 EW 向次级断裂拉张量进行测量,结合主干断裂走滑量与派生次级断裂拉张量之间的定量转换关系进行计算(李伟等,2018),估算出该时期夏口断裂带的水平走滑量约为 2200 m。

4　结论与启示

(1)夏口断裂带为一条由多个 NE、近 EW 向分段组成的呈锯齿状的控洼边界断层,其发育经历了独立生长、软连接、硬连接以及走滑改造 4 个阶段,分期、分段式发育演化导致了夏口断裂几何形态及

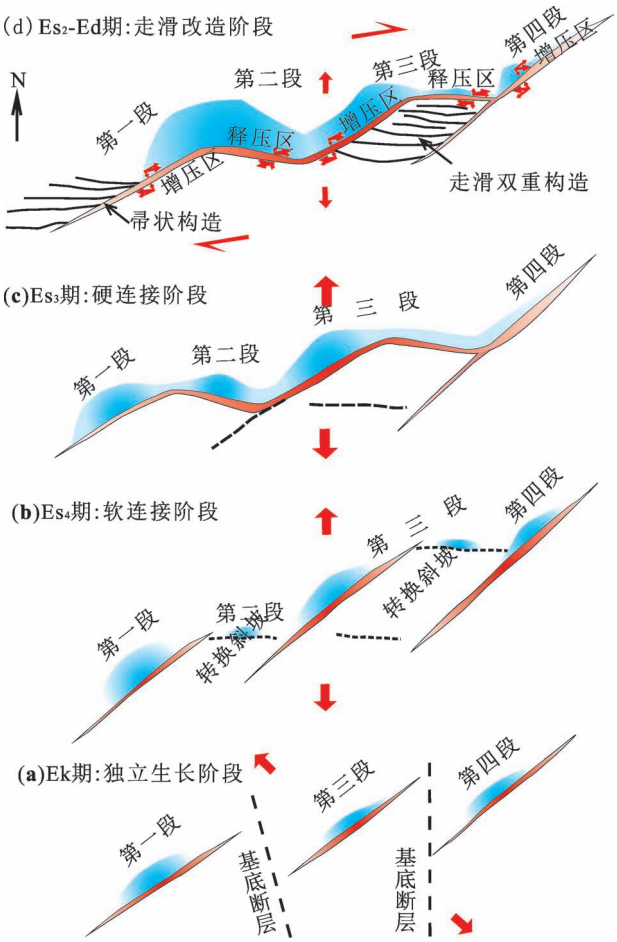


图 6 夏口断裂带连接及结构演化

Fig. 6 Relationship between Xiakou fault zone linkage and structural evolution

活动强度的时空差异。

(2)夏口断裂带各段的中部垂直落差大,在其对应的下降盘位置通常成为沉降中心;而在各断层段侧接相连的位置由于垂直落差小,在其对应的下降盘位置往往成为低凸起,在其对应的上升盘位置则成为有利的物源通道;这对于明确源岩及扇体的展布规律具有重要意义。

(3)夏口断裂带的发育明显区别于典型的正断层生长模式,其经历了后期的走滑改造作用,发育有帚状走滑构造、拉张走滑双重构造,此外由于夏口断裂带呈锯齿状弯曲,在叠加走滑作用的背景下,会出现不同弯曲段的增压与释压的差异,这对于研究该地区断裂对油气输导与封堵作用具有指导意义。

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)

陈伟, 吴智平, 侯峰, 孔菲. 2010. 断裂带内部结构特征及其与油气运聚关系. 石油学报, 31(5): 774~780.

池英柳, 赵文智. 2000. 渤海湾盆地新生代走滑构造与油气聚集. 石油学报, 21(2): 14~20.

高先志, 杜玉民, 张宝收. 2003. 夏口断层封闭性及对油气成藏的控制作用模式. 石油勘探与开发, 30(3): 76~78.

顾玉超, 戴俊生. 2015. 苏北盆地高邮凹陷深凹带生长断层特征与主控因素分析. 大地构造与成矿学, 39(1): 53~61.

郭兴伟, 吴智平, 杨小秋, 许鹤华, 张志珣, 施小斌, 孙珍. 2009. 渤海湾盆地临南洼陷张扭构造演化及应力场数值模拟. 海洋地质与第四纪地质, 29(6): 75~82.

侯贵廷, 钱祥麟, 宋新民. 1998. 渤海湾盆地形成机制研究. 北京大学学报(自然科学版), 34(4): 503~509.

侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 2001. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究. 北京大学学报(自然科学版), 37(6): 845~851.

李伟, 平明明, 周东红, 吴奎, 张婧, 房璐, 陈兴鹏. 2018.辽东湾坳陷新生代主干断裂走滑量的估算及其地质意义. 大地构造与成矿学, 42 (3) : 445~454.

李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 刘丽萍, 金宠, 刘鑫, 郝天珧, 周立宏, 刘保华, 周均太, 焦倩. 2010. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏. 地学前缘, 17(4): 64~89.

林玉祥, 赵乘锦, 朱传真, 吴玉琛, 李佳, 李秀芹. 2016. 济阳坳陷惠民凹陷新生代沉积—沉降中心迁移规律及其机制. 石油与天然气地质, 37(4): 509~519.

刘朝露, 夏斌. 2007. 济阳坳陷新生代构造演化特征与油气成藏组合模式. 天然气地球科学, (02): 209~214.

刘冠德, 夏斌, 于俊峰, 陈根文, 范立勇. 2007. 惠民凹陷南坡北北西向走滑断裂带的发育特征及成因分析. 大地构造与成矿学, 31(2): 168~173.

倪金龙, 刘俊来, 林玉祥, 王智敏, 韩作振, 李月, 曹淑云. 2011. 惠民凹陷西部深层断裂样式与古近纪盆地原型的性质 .中国石油大学学报(自然科学版), 35(1): 20~27.

阙晓铭. 2013. 断层的生长连接研究进展. 岩性油气藏, 25(1): 11~15.

任建业, 于建国, 张俊霞. 2009. 济阳坳陷深层构造及其对中新生代盆地发育的控制作用. 地学前缘, 16(4): 117~137.

孙思敏, 季汉成, 王建伟, 章惠, 陈亮. 2016. 渤海湾盆地南堡凹陷西南庄断层分段特征及演化. 石油实验地质, 38(5): 628~634.

孙思敏, 彭仕宓, 汪新文. 2003. 东濮凹陷兰聊断层的分段特征及其石油地质意义. 石油学报, 24(4): 26~30.

田巍, 何敏, 杨亚娟, 刘海伦, 袁勋, 吴森, 朱定伟, 梅廉夫. 2015. 珠江口盆地惠州凹陷北部边界断裂复合联接和转换. 地球科学——中国地质大学学报, 40(12): 2037~2051.

王有功, 吕延防, 付广, 孙永河, 李鑫. 2014. 复式断陷边界控陷断层生长特征及油气地质意义——以松辽盆地长岭早白垩世复式断陷群东部为例. 地质学报, 88(9): 1666~1676.

吴智平, 李伟, 任拥军, 林畅松. 2003. 济阳坳陷中生代盆地演化及其与新生代盆地叠合关系探讨. 地质学报, 77(2): 280~286.

吴智平, 李伟, 郑德顺, 吕洪波. 2004. 沾化凹陷中、新生代断裂发育及其形成机制分析. 高校地质学报, 10(3): 405~417.

吴智平, 陈伟, 薛雁, 宋国奇, 刘惠民. 2010. 断裂带的结构特征及其对油气的输导和封堵性. 地质学报, 84 (4) : 570~578.

吴智平, 张婧, 任健, 徐长贵, 李伟, 张晓庆. 2016. 辽东湾坳陷东部地区走滑双重构造的发育特征及其石油地质意义. 地质学报, 90(5): 848~856.

夏斌,刘朝露,陈根文. 2006. 渤海湾盆地中新生代构造演化与构造样式. 天然气工业, 26(12): 57~60.

徐长贵. 2016. 渤海走滑转换带及其对大中型油气田形成的控制作用. 地球科学, 9(41): 1548~1560.

颜世永, 吴智平, 李月, 黄铮, 郭新安, 樊瑞. 2010. 渤海湾盆地惠民凹陷临商断层特征及其活动机制. 地质论评, 56(5): 647~652.

张小莉, 冯乔, 查明, 巨银娟, 杨懿. 2008. 惠民凹陷岩浆作用对碎屑岩储层的影响. 地质学报, 82(5): 655~662.

赵利, 李理. 2017. 济阳坳陷内正断层与平移断层关系. 地质论评, 63(1): 50~60.

赵密福, 刘泽容, 信荃麟, 李亚辉. 2000. 惠民凹陷临南地区断层活动特征及控油作用. 石油勘探与开发, 27(6): 9~13.

Anders M H and Schlische R W. 1994. Overlapping faults, intrabasin highs, and the growth of normal faults. The Journal of Geology, 102 (2): 165~179.

Barnett J A, Mortimer J, Rippon J H, Walsh J J and Watterson J. 1987. Displacement Geometry in the Volume Containing a Single Normal Fault. AAPG Bulletin, 71(8): 925~937.

Chen Wei, Wu Zhiping, Hou Feng, Kong Fei. 2010&. Inter structures of fault zones and their relationship with hydrocarbon migration and accumulation. Acta Petrolei Sinica, 31(5): 774~780.

Chi Yingliu and ZHAO Wenzhi. 2000&. Strike-slip deformation during the cenozoic and its Influence on hydrocarbon accumulation in the Bohai Bay basin. Acta Petrolei Sinica, 21(2): 14~20.

Dawers N H and Anders M H. 1995. Displacement—length scaling and fault linkage. Journal of Structural Geology, 17(5): 607~614.

Faulds J E and Stewart J H. 1998. Accommodation Zones and Transfer Zones:The Regional Segmentation of the Basin and Range Province. Geological Society of America Special Publication, 323: 1~45.

Fossen H. 1997. Geometric analysis and scaling relations of deformation bands in Porous sandstone. Journal of Structural Geology, 19(12): 1479~1493.

Fossen H and Rotevatn A. 2016. Fault linkage and relay structures in extensional settings——a review. Earth-Science Reviews, 154: 14~28.

Frankowicz E and McClay K R. 2010. Extentional Fault Segmentation and Linkages, Bonaparte Basin, Outer North West Shelf, Australia. AAPG Bulletin, 94(7): 977~1010.

Frank Z, Guido S, John N and Buiter S J H. 2016. Insights into the effects of oblique extension on continental ruft interaction from 3D analogue and numerical models. Tectonophysics, 693: 239~260.

Gao Xianzhi, Du Yumin, Zhang Baoshou. 2003&. The sealing of Xiakou fault and its model of controlling on the petroleum accumulation. Petroleum Exploration and Development, 30(3): 76~78.

Gu Yuchao and Dai Junsheng. 2015&. Fault growth and main controlling factors in deep area of Gaoyou sag. Geotectonica et Metallogenia, 39 (1): 53~61.

Guo Xingwei, Wu Zhiping, Yang Xiaoqiu, Xu Hehua, Zhang Zhixun, Shi Xiaobin, Sun Zhen. 2009&. The evolution of transtentional structure and numerical modeling of stress field, Linnan subsag, Bohai Bay basin. Marine Geology & Quaternary Geology, 29(6): 75~82.

Gupta A and Scholz C H. 2000. A model of fault interaction based on observations and theory. Journal of Structural Geology, 22: 865~879.

Hou Guiting, Qian Xianglin, Song Xinmin. 1998&. The origin of the Bohai Bay basin. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 34(4): 503~509.

Hou Guiting, Qian Xianglin, Cai Dongsheng. 2001&. The tectonic

evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic time. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 37(6): 845~851.

Jackson C A L, Gawthorpe R L, Carr I D and Sharp I R. 2005. Normal faulting as a control on the stratigraphic development of shallow marine syn-rift sequences: the Nukhul and Lower Rudeis formations, Hammam Faraun fault block, Suez Rift, Egypt. Sedimentology, 52(2): 313~338.

Kim Y S, Peacock D C P and Sanderson D J. 2004. Fault damage zones. Journal of Structural Geology, 26(3): 503~517.

Li Wei, Ping Mingming, Zhou Donghong, Wu Kui, Zhang Jing, Fang Lu, Chen Xingpeng. 2018&. Estimation of the Cenozoic strike-slip displacement for major faults in the Liaodong Bay depression and its geological significance. Geotectonica et Metallogenia, 42(3): 445~454.

Li Sanzhong, Suo Yanhui, Dai Liming, Liu Liping, Jin Chong, Liu Xin, Hao Tianzhao, Zhou Lihong, Liu Baohua, Zhou Juntai, Jiao Qian. 2010&. Development of the Bohai Bay basin and destruction of the North China craton. Earth Science Frontiers, 17(4): 064~089

Lin Yuxiang, Zhao Chengjin, Zhu Chuanzhen, Wu Yuchen, Li Jia, Li Xiuqin. 2016&. Migration pattern and geodynamic mechanism of Cenozoic depocenter and subsidence center in Huimin Sag, Bohai Bay Basin.Oil & Gas Geology, 37(4): 509~519.

Liu Zhaolu and Xia Bin. 2007&. Relationship between Cenozoic tectonic evolution and plays in Jiyang depression. Natural Gas Geoscience, 18(2): 209~214.

Liu Guande, Xia Bin, Yu Junfeng, Chen genwen, Fan Liyong. 2007&. Features and origin of the NNW strike-slip faults on the southern slope pf Huimin Sag. Geotectonica et Metallogenia, 31(2): 168~173.

Morley C K, Haranya C, Phoosongsee W, Pongwapee S, Kornsawan A and Wonganan N. 2004. Activation of rift oblique and rift parallel pre-existing fabrics during extension and their effect on deformation style: Examples from the rifts of Thailand. Journal of Structural Geology, 26: 1803~1829.

Ni Jinlong, Liu Junlai, Lin Yuxiang, Wang Zhimin, Han Zuozhen, Li Yue, Cao Shuyun. 2011&. Style of deep faulting and its control on the Paleogene basin evolved into the western Huimin hepression, Eastern China. Journal of China University of Petroleum, 35(1): 20~27.

Que Xiaoming. 2013&. Research progres on the propagation and linkage of faults. Lithologic Reservoirs, 25(1): 11~15.

Ren Jianye, Yu Jianguo, Zhang Junxia. 2009&. Structures of deep bed in Jiyang Sag and their control over the development of Mesozoic and Cenozoic basins. Earth Science Frontiers, 16(4): 117~137.

Schlische R W and Anders M H. 1996. Stratigraphic effects and tectonic implications of the growth of normal faults and extensional basins. GSA Special Papers, 303: 183~203.

Sun Simin, Ji Hancheng, Wang Jianwei, Zhang Hui, Chen Liang. 2016&. Segmentation characteristics and evolution of Xinanzhuang fault in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin. Petroleum Geology & Experiment, 38(5): 628~634.

Sun Simin, Peng Shimi, Wang Xinwen. 2003&. Segmentation characteristics of Lanliao fault in Dongpu depression. Acta Petrolei Sinica, 24(4): 26~30.

Tian Wei, He Min, Yang Yajuan, Liu Hailun, Yuan Xun, Wu Sen, Zhu Dingwei, Mei Lianfu. 2015&. Complex linkage and transformation of boundary faults of Northern Huizhou sag in Pearl River Mouth basin. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 40(12): 2037~2051.

Wang Yougong, Lv Yanfang, Fu Guang, Sun Yonghe, Li Xin. 2014&. Growth characteristic of boundary control faults and its significance to oil and gas geology——an example from the Early Cretaceous compound fracture in Changling, Songliao Basin. Acta Geologica Sinica, 88(9): 1666~1676.

Wu Zhiping, Li Wei, Ren Yongjun, Lin Changsong. 2003&. Basin evolution in the Mesozoic and Super position of Cenozoic basin in the area of the Jiyang depression. Acta Geologica Sinica, 77(2): 280~286.

Wu Zhiping, Li Wei, Zheng Deshun, Lv Hongbo. 2004&. Analysis on features and origins of the Mesozoic and Cenozoic faults in Zhanhua sag. Geological Journal of China Universities, 10(3): 405~417.

Wu Zhiping, Chen Wei, Xue Yan, Song Guoqi, Liu Huimin. 2010&. Structural characteristics of faulting zone and its ability in transproting and sealing oil and gas. Acta Geologica Sinica, 84(4): 570~578.

Wu Zhiping, Zhang Jing, Ren Jian, Xu Changgui, Li Wei, Zhang Xiaoqing. 2016&. Development characteristic of strike-slip duplex in the eastern part of Liaodong Bay depression and its petroleum geological significance. Acta Geologica Sinica, 90(5): 848~856.

Xia Bin, Liu Zhaolu, Chen Genwen. 2006&. Meso—Cenozoic tectonic evolution and tectonic styles in the Bohai Bay basin. Natur. Gas Ind, 26(12): 57~60.

Xu Changgui. 2016&. Strike-slip transfer zone and its control on formation of medium and large-sized oilfields in Bohai Sea area. Earth Science, 9(41): 1548~1560.

Yan Shiyong, Wu Zhiping, Li Yue, Huang Zheng, Guo Xinan, Fan Rui. 2010&. Characteristics and faulting mechanism of Linshang fault in the Huimin sag, Bohai Bay basin. Geological Review, 56(5): 647~652.

Zhang Xiaoli, Feng Qiao, Zha Ming, Ju Yinjuan, Yang Yi. 2008&. The influence of volcanism on clastic reservoirs in Huimin depression. Acta Geologica Sinica, 82(5): 655~662.

Zhao Li and Li Li. 2017&. The Relationship between normal fault and strike-slip fault in Jiyang depression. Geological Review, 63(1): 50~60.

Zhao Mifu, Liu Zerong, Xin Quanlin, Li Yahui. 2000&. Fault activityfeatures and its control over oil of Linnan areain Huimin depression. Petroleum Exploration and Development, 27(6): 9~13.

Segmentation Characteristics and Genetic Mechanism of Xiakou Fault Zone in Huimin Sag, Jiyang Depression

WANG Di[1)], WU Zhiping[1,2)], LI Wei[1)], LIU Hua[3)], LI Chenyi[3)], ZHANG Yao[1)]

1) *School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong*, 266580;

2) *Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong*, 266235;

3) *Shengli Oil field Company, SINOPEC, Dongying, Shandong*, 257015

Objectives: Xiakou fault zone is a boundary fault in the south of Linnan sag, which controls stratum distribution and hydrocarbon migration. However, its genetic mechanism is still unclear.

Methods: Based on abundant 3D seismic data, analysis of the geometric and growth process of the Xiakou fault zone, the segmentation and periodicity of its development and evolution are revealed and discuss the genetic mechanism.

Results: The results show that Xiakou fault zone is a serrated fault zone and formed by the four segments connecting the NE strike and the EW direction alternately. The evolution process can be divided into four stages under the control of the regional geological. E*k* stage only have NE-trending segments activities (first, third (western) and fourth), and the EW-trending (second and third (eastern)) has not developed. The Xiakou fault zone is in independent growth stage. Es_4 stage with the transformation of regional stress from NW—SE to near S—N, NE-trending segments continue activity and EW-trending fault start activity. Soft connection happend between NE-trending segments. Es_3 stage under the strong tensile action of S—N direction, hard connection occurred in the Xiakou fault zone.The segmented faults in different directions are connected to a whole, forming a serrated fault zone that occurs alternately between NE-trending and EW-trending. Es_2—E*d* is the stage of strike-slip transformation. Broom structures and strike-slip duplex developed in different positions. And produce local tension or extrusion on the different bending segments. It reflects the superposition effect of strike -slip under extension background.

Conclusions: The spatial and temporal difference of the development and evolution of the Xiakou fault zone has an important control effect on the distribution of the settlement center and the source channel in this area.

Keywords: Xiakou Fault Zone, segmental development, genetic mechanism, Huimin Sag

Acknowlegements: This research is supported by the National Major Project (No. 2016ZX05006-007-001) and SINOPEC (No. 30200018-17-ZC0613-0019)

First Author: WANG Di, male, born in 1989, Ph.D candidate, mainly engaged in structural analysis of petroliferous basin, Email: jerry-di@163.com

Corresponding Author: WU Zhiping, male, born in 1967, professor, mainly engaged in structural analysis and reservoir of petroliferous basin, Email: wuzp@upc.edu.cn

Manuscript received on: 2018-03-23; Accepted on: 2018-09-11; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2018.06.004