

松辽盆地伏龙泉断陷边界断层构造反转率

张美华,王春华,栾颖

(中国石化 东北油气分公司,吉林 长春 130062)

摘要:盆地边界断层通常为同沉积断层,同沉积断层活动时间相对短且具有间歇性,地层沉积时间相对较长,这决定了断陷盆地的地层分布格局。通过分析同沉积断层理论模式,认为断陷缓坡带地层厚度与边界断层下盘厚度相当,边界断层下盘通常缺失与上盘对应的地层,可选择断陷盆地缓坡带地层厚度代替边界断层下盘厚度,建立虚拟下盘厚度格架,然后运用位移-距离曲线等方法对边界断层开展定量研究。伏龙泉断陷位于松辽盆地东南部,为东断西超的半地堑盆地,发育4条边界断层,依次控制了4个沉积次洼,4条边界断层的活动强度和反转程度存在差异。伏龙泉断陷经历了断陷期、拗陷期、反转期三个主要的构造期次,分别对应于边界断层强烈活动、停止活动、反转活动3个演化阶段,发生于白垩纪末的反转活动使得边界断层再次活化,形成油气运移通道,深层油气向上运移到浅层圈闭中,形成次生油气藏。通过定量计算伏龙泉断陷各边界断层的反转率,结合油气富集规律认识,认为反转率适中的区域最有利于次生油气藏的形成和保存。

关键词:构造反转;位移-距离曲线;反转率;同沉积断层;边界断层;松辽盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Inverted rate of boundary faults along Fulongquan fault depression,
Songliao Basin

Zhang Meihua, Wang Chunhua, Luan Ying

(Northeast Oil and Gas Branch Company, SINOPEC, Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: The boundary faults of basin are generally synsedimentary faults, which are characterized as having relatively short period of activity with intermittency and relatively long stratum deposition. The two factors together determine the stratigraphic distribution of fault depression basins. This paper analyzed the theoretical model of synsedimentary faults. Results show that the thickness of the gentle slope zones of the fault depression is equivalent to that of the footwall of the boundary fault, and at the footwall, the strata corresponding to the upper wall are usually absent. The thickness of strata in the gentle slope zone can replace that of the footwall of the boundary fault, and a virtual footwall thickness framework can be established, then the boundary faults can be studied quantitatively by means of displacement-distance graphs. Fulongquan fault depression locating in the southeast of Songliao Basin, a half-graben basin with faulting in the east and overlapping in the west, develops four boundary faults controlling four sub-sags in turn, and the activity intensity and inversion degree of these boundary faults are different. It has experienced three main structural movement, fault depression, depression, and inversion, corresponding to the three active phases of boundary faults, intense activity, inactivity, and inverting activity. The structural inversion which happened in the end of the Cretaceous, functions to reactivate the boundary faults and form hydrocarbon migration paths; hence the deep hydrocarbons migrated upward to the shallower traps, and the secondary hydrocarbon reservoirs are thus produced. The quantitative study about the inverted rate of each boundary fault, combined with the study of hydrocarbon accumulation patterns in Fulongquan fault depression, indicates that the areas with medium inverted rate are the most conducive in the generation and preservation of secondary hydrocarbon reservoirs.

Key words: structural inversion, displacement-distance graph, inverted rate, synsedimentary fault, boundary fault, Songliao Basin

收稿日期:2018-03-12;修订日期:2018-12-04。

第一作者简介:张美华(1982—),男,工程师,石油地质。E-mail: zhangmeiyin@foxmail.com。

基金项目:中国石化集团公司科技部项目(P15116)。

对于同沉积断层定量分析有多种方法:生长指数、活动速率、古落差、位移-长度关系、古滑距等^[1],对于反转断层研究有反转率、位移-距离曲线等方法^[2-7]。近年来,国内学者在研究同沉积断层时,对上述方法开展了探讨和应用,使用较多的方法是古落差、位移-长度关系及断层活动速率^[8-11],以此来判断盆地的沉降及沉积展布规律。在实际研究中,盆地边界断层通常为同沉积断层,边界断层上盘地层保存较为完整,下盘位于沉积盆地外,缺失与上盘对应的同期地层,这就造成了上述反转率、位移-距离曲线、断层生长指数方法无法使用,而边界断层与盆地结构与油气分布关系密切,断层活动影响各种成藏组合油气宏观分布,控制了油气富集类型及富集区带^[12]。有学者提出了楔形发散相指数法^[13],地层楔形体法^[14]来定量评价边界断层。针对边界断层,本文提出一种虚拟下盘厚度的方法,结合松辽盆地伏龙泉断陷实际资料(研究区大部被三维地震资料覆盖,本文构造剖面均为时深转换后的深度域剖面),探讨对边界断层进行定量分析的方法。

1 同沉积断层形成的理论模式

同沉积断层又名生长断层、同生断层,具有边生长,边沉积的特点^[15],实际上,断层活动具有间歇性和突发性,活动的过程剧烈且时间短,活动结束后进入相对稳定期,然后接受地层沉积,而沉积的过程相对较长,直到断层再次活动。同沉积断层的这种活动特点称为幕式活动,断层的一次周期性幕式活动分为活动期和间歇期两个阶段^[16]。本文假设沉积速率仅与同沉积断层活动有关,建立同沉积断层形成模式(图1)。

为进一步解释同沉积断层的生长过程,本文引入断面长度的概念,断面长度定义为断层破裂面在断层倾向剖面上的长度。代表了断层在纵向上的存在范围。

将某同沉积断层的形成过程分为3期(图1)。从理论模式对应的断层活动强度、沉积速率、断面长度与时间关系图(图1g—i)来看,断层活动强度呈尖峰状,在无断层活动的情况下,沉积速率稳定,随着断层开始第1期活动,沉积速率激增,进入A地层沉积阶段,可容纳空间不断被充填,沉积速率呈减小趋势,直到第2期断层活动,沉积速率再次激增,B地层沉积。在同沉积断层幕式活动背景下,沉积速率呈锯齿状变化。断层活动导致断面长度增加,断层活动结束后,断面长度保持不变,断面长度与时间关系呈台阶状。

从上述理论模式可以看出:同沉积断层的生长并非单向切割老地层,其具有向上断开新地层,同时向下切割老地层的特点;同沉积断层上下盘厚度差,主要是由于断层活动造成的上盘断陷可容纳空间大于下盘造成的。

从同沉积断层形成立体模式图来看(图1a',b',c'):断层第1期活动在基岩上形成了第1期断陷区(图1a'点f1,g1,j1范围内),基岩顶面f1处断距最大,往断层两端断距逐渐减小,断层末端g1处断距为零,然后断层停止活动,被A地层填平补齐(图1b'),A地层的厚薄展布定型,假设后续构造及沉积不再影响A地层厚度分布,断陷区内(图1b'点f1,g1,j1范围内)地层厚度受断层控制,而断陷区外地层厚度大致相当,断距最大处生长指数最大,断层末端生长指数为1,因此断层末端g1位置下盘厚度与上盘厚度一致。同沉积断层第2期活动导致A地层陷落,形成第2期断陷区(图1c'点f2,g2,j2范围内),同时断层水平生长,长度增加,第2期断陷区面积比第1期扩大,A地层顶面在f2处断距最大,g2处断距为零,此时A地层在断陷区内(图1c'点f2,g2,j2范围内)产状发生变化,但厚度分布格局未变。此时不仅第2期断陷区外地层厚度基本一致,断陷区内缓坡带g1与g2之间、j1与j2之间的地层厚度也与断陷区外相当。这就为用缓坡带地层厚度代替边界断层下盘厚度提供了理论依据。

上述理论模型基于平缓地貌、构造单一条件下产生断陷,待断陷填平补齐后,沉积了厚度相对稳定的地层,盆地处于过补偿状态,而实际情况下,断陷地层往往保存不完整,由于剥蚀,古地貌及沉积速率等多种变化因素,造成断陷各位置沉积厚度分布不稳定,断陷区外的地层厚度变化也较大。本文通过分析实际资料结合上述理论模型,完善反转率及位移-距离曲线方法,尽可能接近边界断层生长演化的真实情况。

2 伏龙泉断陷地质概况

伏龙泉断陷位于松辽盆地南部,为东南隆起区上的一个次级断陷,该断陷发育4条边界断层(F1-F4),自南向北雁列状分布,依次控制了4个沉积次洼(F4边界断层资料较少,本次研究不涉及),整体构造格局为东断西超的半地堑(图2)。

伏龙泉断陷自下而上发育下白垩统[火石岭组(K_1h)、沙河子组(K_1sh)、营城组(K_1yc)、登娄库组

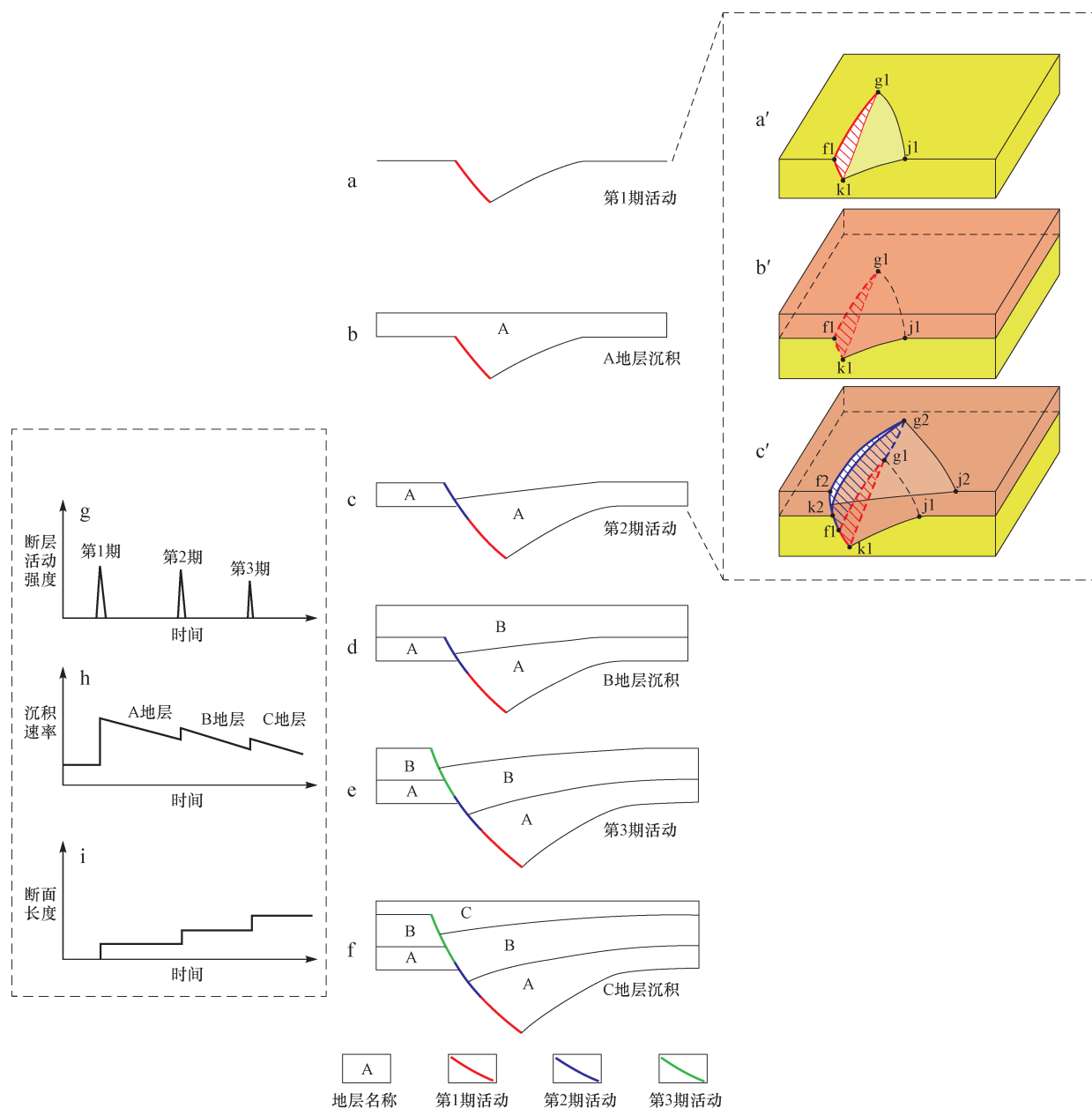


图1 同沉积断层形成理论模式

Fig. 1 The theoretical model of the formation of syndepositional faults

a. 在基岩地层上断层开始第1期活动,形成断陷;b. 断层活动停止,进入A地层充填阶段,将断陷填平补齐,在区域整体下陷背景下,断陷外也沉积了一定的厚度;c. 断层开始第2期活动,A地层被断开,同时第1期断层下切,A地台下陷形成了新的断陷;d. B地层充填阶段;e. 断层第3期活动;f. C地层充填;g,h,i. 断层活动与时间关系;a',b',c'. 同沉积断层形成立体模式

(K_1d)、泉头组(K_1q),上白垩统[青山口组(K_2qn),姚家组(K_2y),嫩江组(K_2n)]及第四系(Q)。伏龙泉断陷经历过3个主要的构造阶段:断陷期-拗陷期-反转期。

从伏龙泉断陷构造发育剖面上看(图3),火石岭组为断陷前沉积,地层分布与边界断层活动关系不大,主要受火山地貌控制,局部发育沉积地层。沙河子组时期开始进入断陷期,断陷期受南东-北西向拉张应力作用,边界断层强烈活动,形成断陷,发育沙河子组、

营城组,地层厚度受边界断层控制;登娄库组时期为断拗转换阶段,早期边界断层仍然在活动,地层厚度仍然受到控制,晚期边界断层活动停止,地层厚度不受边界断层控制;拗陷期发育泉头组及以后上白垩统,断层停止活动,地层厚度不受边界断层控制;上白垩统明水组末期(即白垩系 K_2 末期)进入反转期,此时受南东-北西向挤压应力作用,边界断层再次活动,性质转变为逆断层,伏龙泉断陷整体抬升遭受剥蚀,在边界断层附近形成反转背斜构造。

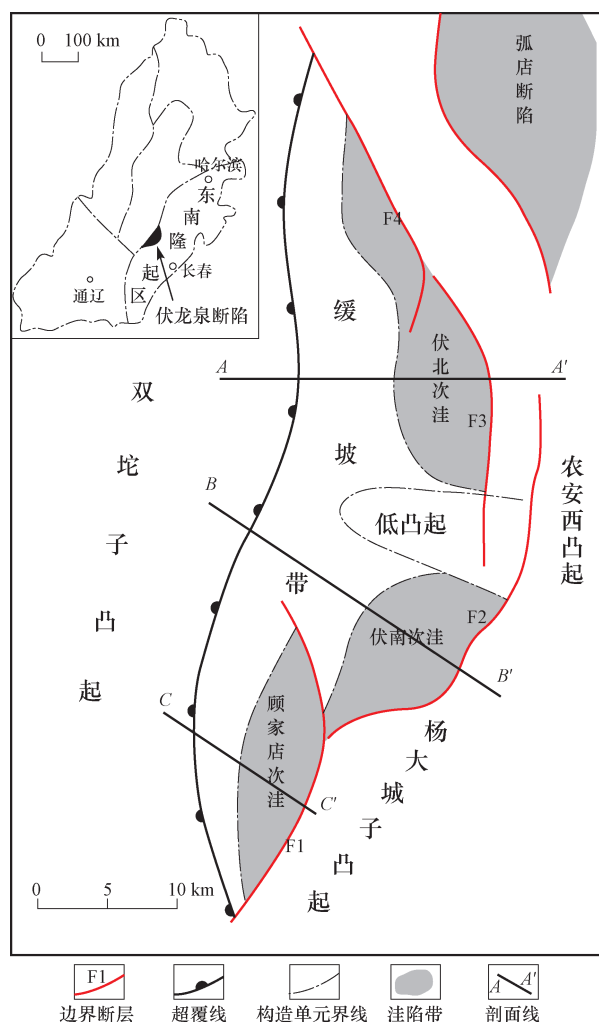


图2 伏龙泉断陷构造位置

Fig. 2 The structural location of Fulongquan fault depression

伏龙泉断陷烃源岩主要位于沙河子组、营城组中,保存于断陷期地层(沙河子组、营城组、登娄库组下部)中的油气藏为原生藏,保存于拗陷期地层(登娄库组上部、泉头组)中的为次生藏。明水组末期的构造反转是次生藏形成的重要因素,反转运动活化了断陷期的断裂体系,并破坏了部分原生藏,油气沿断层向上运移到拗陷期地层中,从而形成次生藏。

3 反转构造与油气成藏关系

3.1 反转构造的研究方法

反转作用可定义为^[4]:原先由张性-张扭性断层控制、常有同沉积期地层(被动充填层序)发育的上盘盆地(地堑或半地堑),后来在压性-压扭作用下发生隆起和局部挤出,由此产生的构造即为反转构造(图4)。为研究其反转率,取沿断面的同沉积期上盘

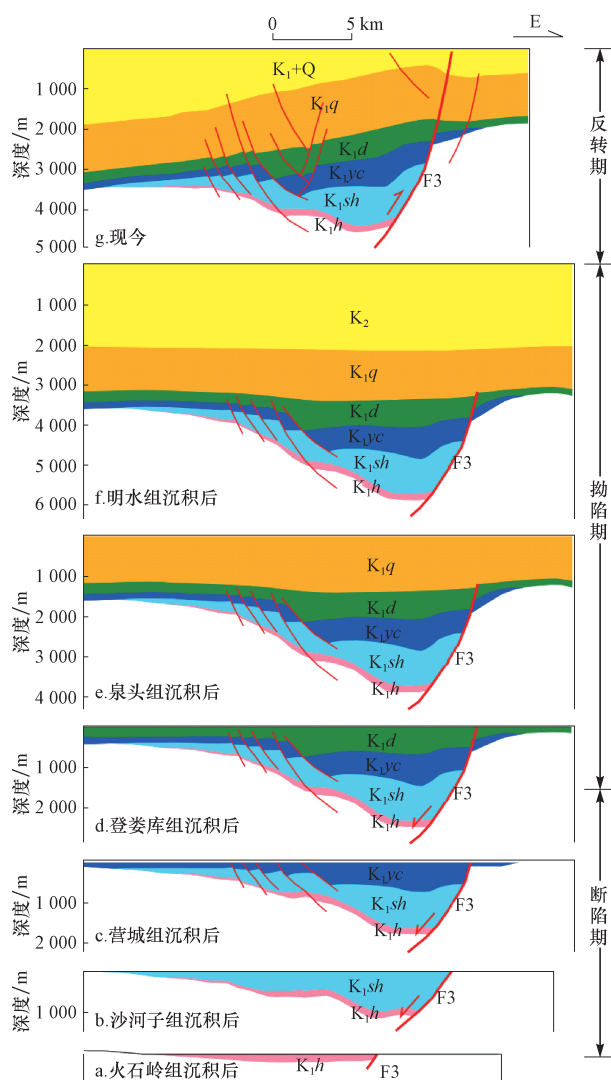


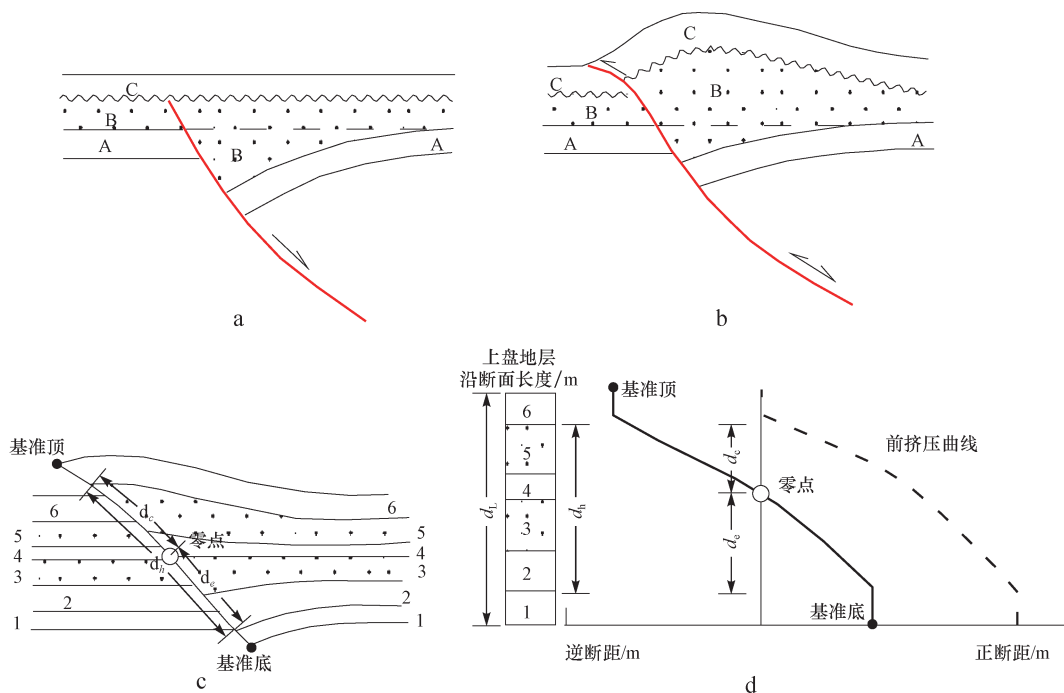
图3 伏龙泉断陷构造发育剖面图(剖面位置见图2,AA')

Fig. 3 Section diagram showing the structural development of Fulongquan fault depression, (see Fig. 2 for the section location)

地层长度(d_h , m), 地层位移零点以上长度(d_c , m), 地层位移零点以下长度(d_e , m), 计算反转率公式为^[2]:

$$R_i = d_e/d_h \quad (1)$$

反转率 R_i 值无单位, 仅用于定量表示反转构造的反转程度。把同沉积前地层的底面当作基准底, 可以在断层上盘测量该面至各层位的顺断层距离。用纵坐标标绘这一距离。而在左、右两侧的横坐标分别标绘各地层界面的逆断层距和正断层距, 这样就可以得到一幅反映反转构造运动学演化的位移-距离曲线(图4d)。图4d中右侧的虚线是由线性构造造成的, 其斜率的变化反映了张性断层的发育特征。它与纵坐标的交点就是反转前构造的零点。在此后的收缩反转中, 整条曲线虽保留其基本形状, 但需在横坐标上移动若干距离, 间距的大小与反转程度(反转率)有关。这时零点顺

图4 反转构造理论模式及位移-距离曲线^[3-4]Fig. 4 The theoretical model of inverted structures and sketch of displacement-distance graph^[3-4]

a. 反转前构造剖面,其中A为同沉积前地层,B为同沉积期地层,C为同沉积后地层;b. 反转后构造剖面,上盘地层沿断面发生位移反转,断层性质转变为逆断层;c. 反转剖面示意图,其中1为同沉积前地层,6为同沉积后地层,上下盘厚度一致,其他2~5为同沉积期地层,上盘地层厚度大于下盘;d. 反转构造的位移-距离曲线,c中基准顶到基准底的断面长度 d_L 为纵坐标最大值,以各地层界面到基准底的长度为纵坐标值,以各地层界面的断距为横坐标值,标注到该坐标系内,并用曲线连接,曲线和纵坐标轴的交点即为地层位移零点

纵坐标下移,真实地反映了反转时的情形。计算反转率所需参数(d_h, d_c, d_e)也可在图中直接得到^[4]。

国内学者运用上述反转构造研究方法^[7,17],也有学者提出针对负反转构造的位移-距离曲线改进方法^[18],取得了良好的研究成果,但其研究对象限于盆地内同沉积断层。对于各断陷盆地广泛存在的边界断层,除前文所述的楔形发散相指数与地层楔形体外,也有研究人员运用2D Move软件编制平衡剖面,测量剖面地层的反转强度因子^[19],以及根据地层厚度变化率估算反转期地层剥蚀量的剥蚀比率法^[20]。

上述方法优点在于能定量评价反转强度,缺点在于无法评价盆地边界断层,因为边界断层下盘地层不能与上盘对应,无法读取层位的位移数据。

为解决上述问题,定量研究边界断层,本文提出虚拟下盘地层厚度的方法,具体方法如下,选择边界断层上盘缓坡带远离边界断层位置,该位置未遭受明显剥蚀,地层分布相对稳定,近似认为该位置厚度与边界断层下盘沉积厚度相当,将其移植到边界断层下盘,然后开展定量研究。

3.2 研究实例

以伏龙泉断陷伏北次洼为例(图2),伏北次洼边

界断层F3,上盘地层齐全,下盘缺失 K_1h 、 K_1sh 及部分 K_1yc 地层(图5a)。对F3断层应用位移-距离曲线法开展研究,研究层位包含同沉积期地层(K_1sh 、 K_1yc 、 K_1d),同沉积前地层(K_1h),同沉积后地层选择上白垩统泉头组一段(K_1q^1)。

不同断层之间断面长度和断距值差别巨大,因此不同断层的位移-距离曲线坐标系缺乏可比性,而如前文所述反转率(R_i)值无单位,仅用于定量表示反转构造的反转程度,其计算参数均来自于断层自身,不受其绝对值大小的影响。本文以断层上盘地层沿断面长度 d_L 为1进行归一化处理,纵坐标为地层界面沿断面长度与 d_L 的比值,横坐标为断距与 d_L 的比值,因此坐标轴最大值为1(图5b),处理后的位移-距离曲线的坐标轴无单位,统一坐标系便于不同断层之间的对比。

F3边界断层下盘 K_1d 以下地层保存不完整,取断陷缓坡带 K_1yc 、 K_1sh 厚度相对稳定区域的地层厚度 h_y 、 h_s 为虚拟下盘厚度, K_1h 为同沉积前地层,其厚度不受边界断层F3控制,取靠近边界断层位置厚度 h_h ,将上述虚拟下盘厚度移植到下盘 K_1d 底面以下(图5a),然后测量剖面并编制F3断层的位移-距离

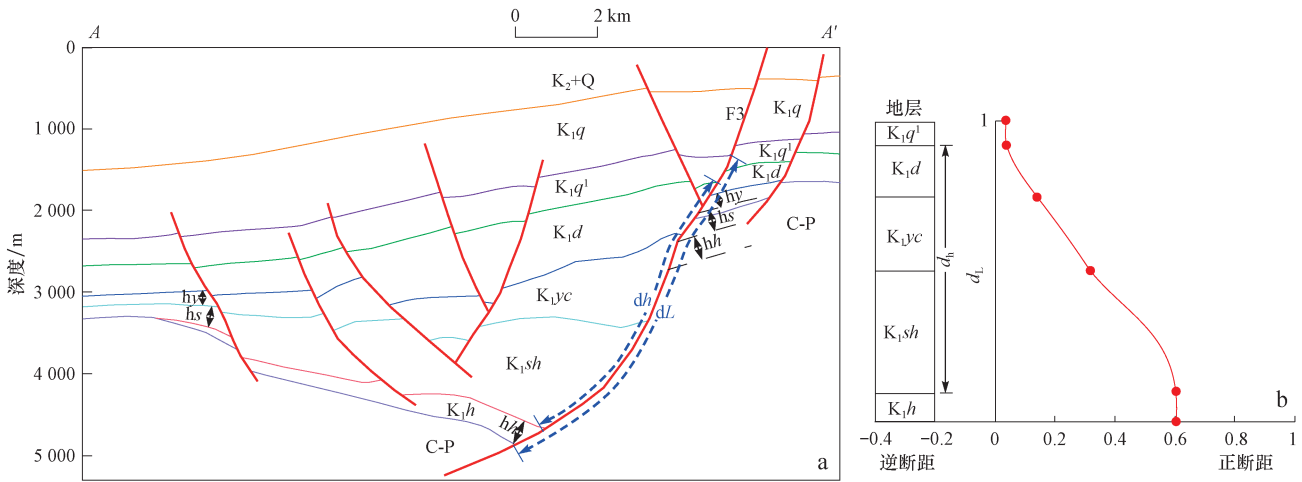


图 5 伏北次洼构造剖面图 AA'(a) 及 F3 断层位移-距离曲线(b) (剖面位置见图 2)

Fig. 5 Structural section AA' of Fubei sub-sag and the displacement-distance graph of boundary fault F3 (see Fig. 2 for the section location)
a. 伏北次洼 AA' 构造剖面, F3 断层上盘地层 ($K_1h-K_1q^1$) 沿断面长度为 d_L , 同沉积期地层 (K_1sh-K_1d) 沿断面长度为 d_h ; b. F3 断层位移-距离曲线

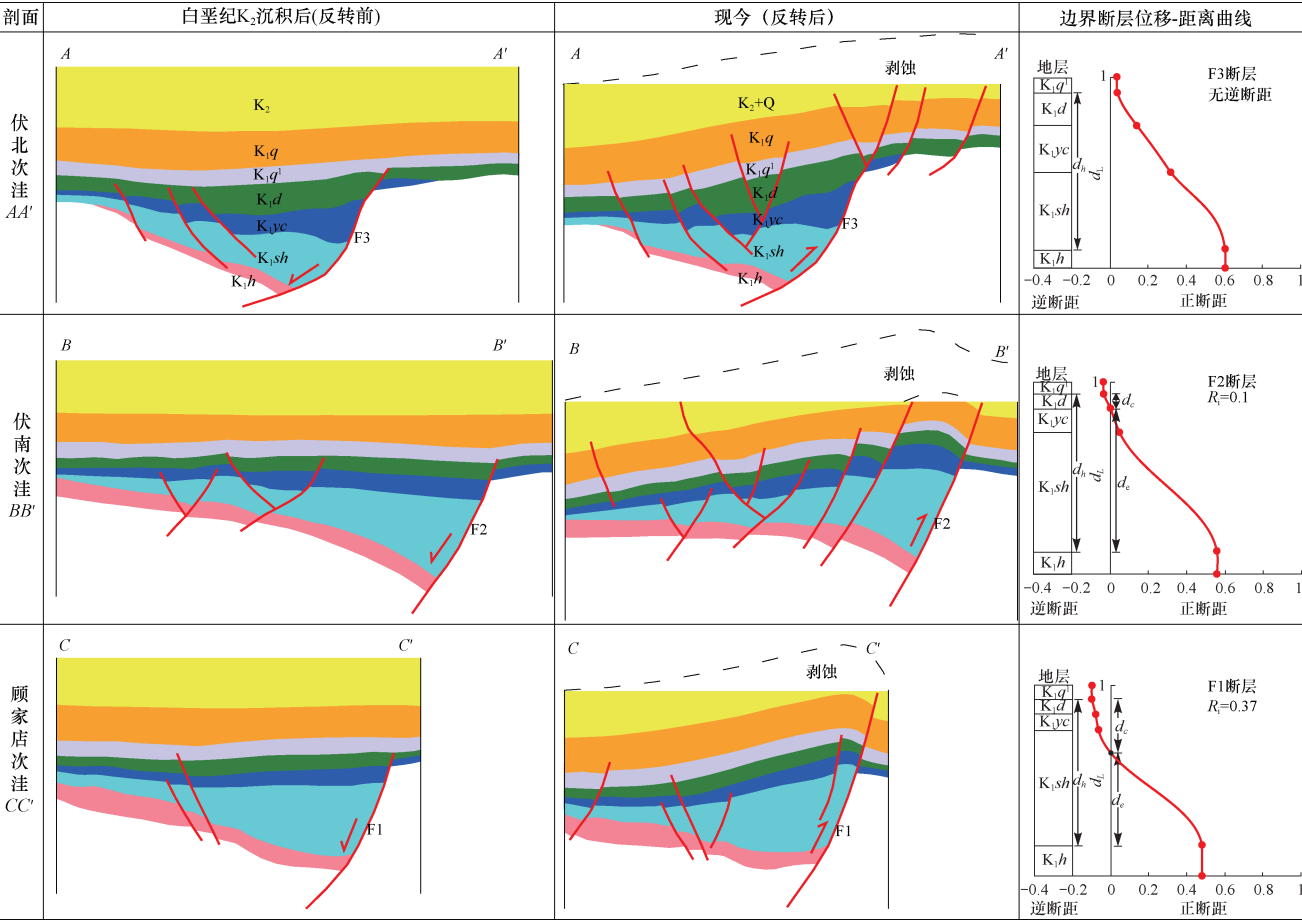


图 6 伏龙泉断陷反转期构造发育剖面及边界断层位移-距离曲线 (剖面位置见图 2)

Fig. 6 Section diagram showing the structural development in inversion and displacement-distance graph of boundary faults in Fulongquan fault depression (see Fig. 2 for the section location)

曲线(图 5b), 所有地层在边界断层 F3 位置上均为正断距, 表明边界断层 F3 性质未发生变化, 依据文献^[21]标准, 属于轻微反转。

用同样的方法对伏南次洼 F2 断层、顾家店次洼 F1 断层开展研究(图 6), 下盘同样缺失同沉积期地层, 因此读取缓坡带的地层厚度, 建立虚拟下盘厚度,

然后编制边界断层的位移-距离曲线,可计算得伏南次洼 F2 断层反转率 $R_i = 0.1$, 顾家店次洼 F1 断层反转率 $R_i = 0.37$ 。

从伏龙泉断陷反转期构造发育剖面来看(图6),上白垩统明水组时期(即 K_2 末期)本区地层保存完整,拗陷期地层叠置于断陷期地层之上,拗陷期地层中不发育断层;明水组末期发生构造反转,断陷东部整体抬升并遭受剥蚀,在抬升过程中,边界断层重新开始活动,性质由正断层转变为逆断层,并断开拗陷期地层。反转后,边界断层表现为“下正上逆”的特点。

用地层趋势法恢复地层剥蚀厚度(图6虚线),伏北次洼与顾家店次洼的 $K_2 + Q$ 遭受了一定程度的剥蚀,伏南次洼 BB' 剖面剥蚀程度最大,在边界断层附近,不仅 $K_2 + Q$ 被剥蚀殆尽, K_1q 也受到了一定程度的剥蚀。但本文研究表明,剥蚀程度最大并不意味着构造反转率最大(见图6反转率 R_i 值),伏南次洼边界断层附近的区域性抬升作用较强才是剥蚀程度最大的主要原因。

按照文献^[22]分类标准,伏龙泉断陷反转构造均为正反转构造,可进一步归属于断裂型,伏北次洼边界断层性质为上下均正,伏南次洼与顾家店次洼为下正上逆。

通过位移-距离曲线方法计算得顾家店次洼反转率 0.37,伏南次洼反转率 0.1,伏北次洼边界断层性质无反转,整体上,伏龙泉断陷边界断层都属于轻微反转构造。

3.3 反转构造与油气富集规律

伏龙泉断陷已发现油气藏主要集中于反转期形成

的背斜构造中,是拗陷期地层受反转挤压形成的构造,3个背斜高点叠置于断陷期的3个沉积次洼之上,从而形成“下生上储”的圈源配置关系。边界断层既是形成构造的有利因素,同时也是油气运移通道。

其中伏南次洼油气最为富集,伏北次洼次之,顾家店次洼最差。研究认为这与反转程度有关,上文计算得伏南次洼反转程度适中,这最有利于次生藏的形成和保存,伏北次洼反转程度弱不利于形成构造圈闭,顾家店次洼反转程度太强会对圈闭造成破坏,这与邻区孤店断陷的勘探经验(反转率小于 0.20 有利)^[23]一致。

4 讨论

4.1 研究结论的真实性

虚拟下盘厚度法也存在一些问题,首先没有考虑地层压实效应,且虚拟厚度取值处地层可能存在剥蚀,保存不完整的情况;本方法假设不发育同沉积断层的情况下,盆地整体地层沉降速率与沉积速率基本一致,这没有考虑同沉积断层本身对下盘地层厚度也有影响。

尽管存在一些问题,虚拟下盘厚度方法结果是符合真实情况的,理论上同沉积断层下盘地层的发育存在两个极限情况,以伏北次洼边界断层 F3 为例:一是下盘完全缺失同沉积期地层(图7a),此时相当于所有地层都凝缩到同沉积后地层(K_1q^1)底面,这种情况下的位移-距离曲线如图7c中蓝线,此时断层生长指数为无限大;二是下盘不缺失任何地层(图7b),且边界断层断距为零,这种情况下的位移-距离曲线与纵

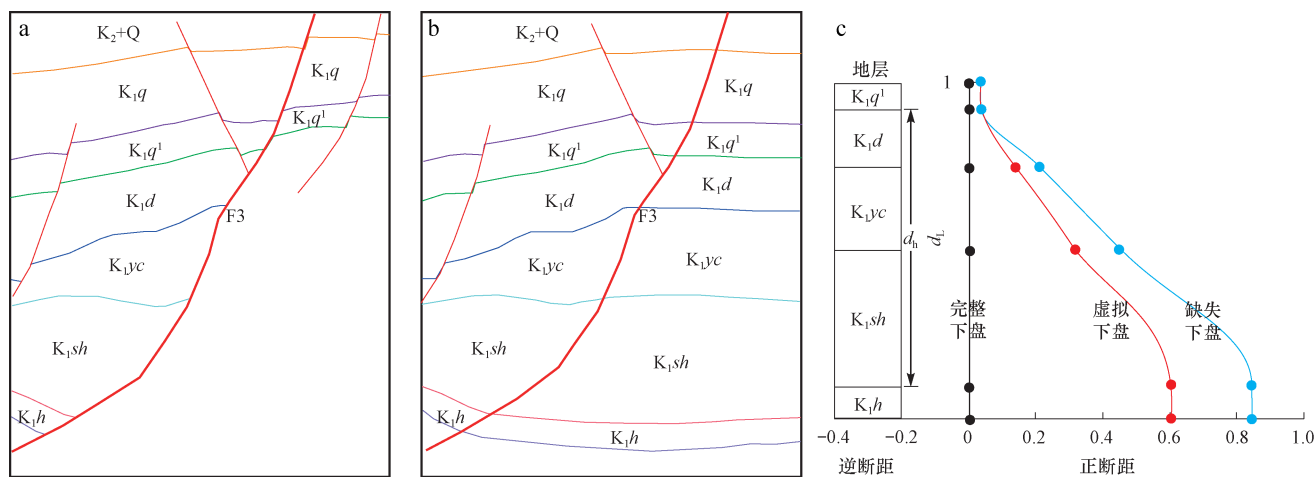


图7 伏龙泉断陷 F3 边界断层构造剖面及位移-距离曲线

Fig. 7 The structural section and displacement-distance graph of boundary fault F3 in Fulongquan fault depression

a. 完全缺失下盘地层的情况; b. 完整下盘地层的情况; c. 各种情况对应的位移-距离曲线

坐标轴重合,各地层断距为零,该情况实际上相当于上边界断层不存在。

而真实的边界断层位移-距离曲线应介于这两种情况之间,因此采用本文所述虚拟下盘厚度(图7c中红线)是一种接近真实情况的研究方法。

4.2 虚拟下盘厚度的取值原则

据陆相断陷湖盆缓坡带的构造特征及层序发育特征,可将其划分为3种类型:宽缓型、窄陡型、双元型^[24]。结合前文理论模型,半地堑是在边界正断层控制下,发生的旋转沉降,必然形成由陡坡、深洼到缓坡的结构,边界断层导致挠曲形成的垂直位移,由断层向远端逐渐减小,最终形成相对稳定区域。断陷盆地缓坡带(尤其是宽缓型)地层厚度存在一个较为稳定的区域,本文认为可用此区域厚度来代替边界断层下盘厚度。实际情况下,多数断陷盆地从缓坡带盆地边缘

到深洼带地层并非均匀增厚,而是在断层或坡折的作用下,厚度才发生明显变化,在断层和坡折以外,厚度分布是相对稳定的。

断陷缓坡带地层厚度并不均匀,在各剖面上得出的稳定区厚度存在误差,可结合地层厚度图进行分析,确定合理的厚度区间范围。从伏龙泉断陷沙河子地层厚度(图8a)来看,缓坡带厚度变化较小,围绕断陷分布存在一个厚度稳定的环带,这个环带从边界断层的一侧端点开始,经过缓坡带,与另一侧端点相接,大致相当于图上厚度200~400 m,由于伏龙泉断陷发育多条边界断层,因此,环带从最南端F1断层一直延伸到最北端F4断层。

除参考厚度平面图外,还可借鉴地震相特征来判断厚度稳定区,地貌控制着沉积,形成不同的地震相。稳定区地震同相轴分布稳定,呈平行状(图8b—d),是在近水平地貌条件下的沉积地层。发散状地震相代表

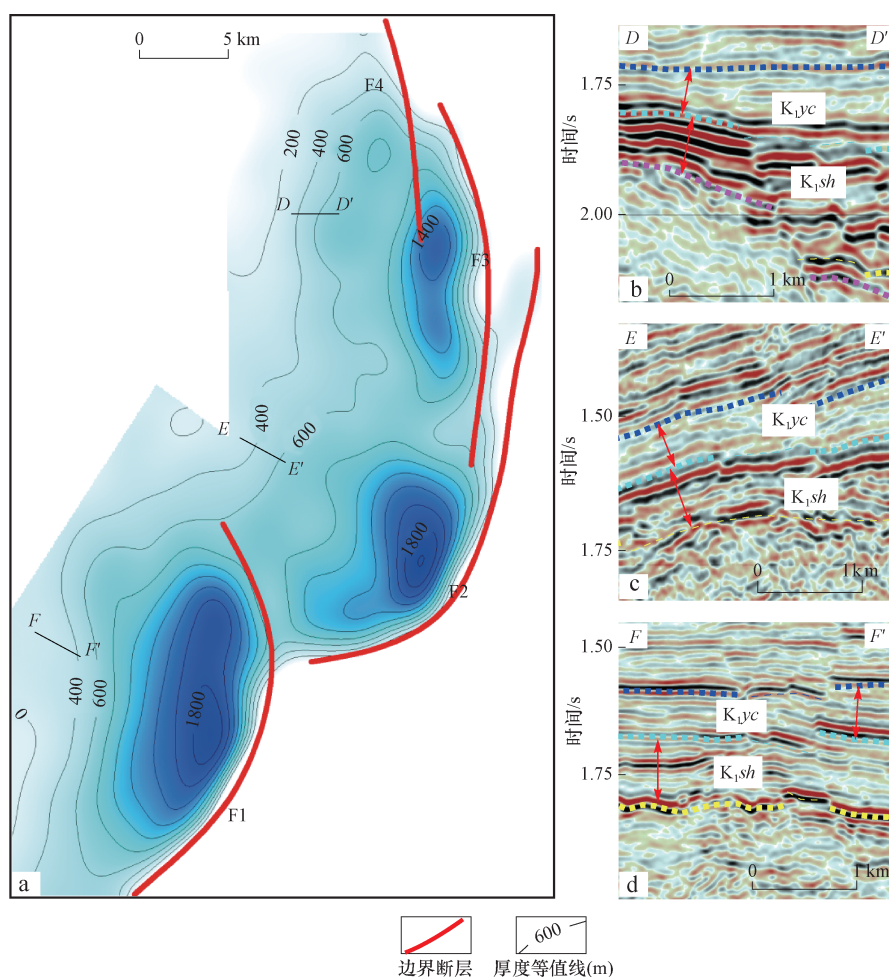


图8 伏龙泉断陷沙河子组地层厚度图及缓坡带典型地震剖面
Fig. 8 Isopach map of K_1sh formation and typical seismic profiles of the gentle slope zones in Fulongquan fault depression

a. 沙河子组地层厚度;b. 伏北次洼缓坡带地震剖面 DD' ;c. 伏南次洼缓坡带地震剖面 EE' ;d. 顾家店次洼缓坡带地震剖面 FF'

地层增厚,是边界断层活动导致的,而在断陷盆地缓坡带往往存在一个临界点,从发散状地震相转变到平行状地震相,临界点以外的平行地震相区域地层厚度可近似代表虚拟下盘厚度。

因此虚拟下盘厚度取值可参考3个原则:①构造剖面缓坡带厚度相对稳定区;②地层厚度平面图缓坡带厚度稳定分布环带;③缓坡带地震相平行稳定区。实际研究过程中,应综合考虑。

4.3 与其他定量研究方法比较

针对边界断层,通过虚拟下盘厚度,不仅可以编制位移-距离曲线,进行反转率研究,也可进行断层生长指数研究,断层定量研究的范围扩大到了边界断层。

边界断层研究常用古落差方法,上盘沉降接受沉积,下盘抬升遭受剥蚀,因此在某一地质时期的断层落差应表示为:断层落差(D) = 上盘沉积厚度 + 下盘剥蚀厚度^[25]。但对于下盘剥蚀厚度难以确定,所以通常仍然采用两盘地层的厚度差来表示,即:断层落差(D) = 上盘沉积厚度 - 下盘沉积厚度。下盘残余沉积厚度较小,甚至为零,这就造成计算得到的古落差实际就是上盘的沉积厚度,比真实值偏大,如果采用虚拟下盘厚度值,会更接近断层生长的真实情况。

断陷的形成通常伴随着区域性整体沉降,虚拟下盘厚度能代表这种整体沉降的程度:值越小,整体沉降弱,值越大,整体沉降强。

5 结论

1) 盆地边界断层决定了断陷地层厚度分布格局,而边界断层通常为同沉积断层,下盘缺失与上盘对应的同期地层,理论上可用断陷缓坡带地层厚度代替边界断层下盘厚度。

2) 伏龙泉断陷在上白垩统明水组末期(白垩纪末)整体构造反转,断陷内各次洼反转程度存在差异,通过边界断层反转率计算得顾家店次洼反转率0.37,伏南次洼反转率0.1,伏北次洼反转轻微。从油气分布来看,伏南次洼油气最为富集,伏北次洼次之,顾家店次洼最差。本文认为伏南次洼反转率适中,最有利于次生油气藏的形成和保存,伏北次洼反转弱不利于形成构造圈闭,顾家店次洼反转太强造成圈闭被破坏。

3) 应用虚拟下盘厚度法研究盆地边界断层可参考3个原则:①构造剖面缓坡带厚度相对稳定区;②地

层厚度平面图缓坡带厚度稳定分布环带;③缓坡带地震相平行稳定区;并综合考虑。

参 考 文 献

- [1] 雷宝华. 生长断层活动强度定量研究的主要方法评述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(9): 947-956.
Lei Baohua. Review of methods with quantitative studies of activity intensity of the growth fault[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(9): 947-956.
- [2] Cooper M A, Williams G D, Graciansky P C, et al. Inversion tectonics—a discussion[J]. Geological Society, 1989, 44: 335-347.
- [3] Williams G D, Powell C M, Cooper M A. Geometry and kinematics of inversion tectonics[J]. Geological Society, 1989, 44: 3-15.
- [4] 朱起煌. 反转构造的运动学分析与形态类型[J]. 中国海上油气(地质), 1994, 8(4): 244-251.
Zhu Qihuang. Kinematic analysis and geometric types of inversion structure[J]. China Offshore Oil and Gas (geology), 1994, 8(4): 244-251.
- [5] 周祖翼. 反转构造[J]. 地质科技情报, 1994, 13(1): 3-11.
Zhou Zuyi. Inversion tectonics: progress and Prospects[J]. Geological Science and Technology Information, 1994, 13(1): 3-11.
- [6] 陈昭年, 陈发景. 反转构造与油气圈闭[J]. 地学前缘, 1995, 2(3): 96-102.
Chen Zhaonian, Chen Fajing. Inversion structures and their relationship to traps of oil and gas[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3): 96-102.
- [7] 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.
Tang Liangjie, Jin Zhijun. Analysis on main inversion phase and intensity of negative inversion fault[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1999, 23(6): 1-5.
- [8] 杨晓利, 张自力, 孙明, 等. 同沉积断层控砂模式——以南堡凹陷南部地区 Es¹ 段为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 526-533.
Yang Xiaoli, Zhang Zili, Sun Ming, et al. Models of contemporaneous fault controlling sandstone deposition: a case study of Es¹ in southern Nanpu Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 526-533.
- [9] 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.
Li Qingying, Luo Fengzhi, Miao Cuizhi. Research on fault activity ratio and its application[J]. Fault-Block Oil & Gas field, 2000, 7(2): 15-17.
- [10] 庞小军, 王清斌, 代黎明, 等. 渤海海域北部秦南凹陷东南缘古近系断层活动及其对沉积的控制[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1059-1067.
Pang Xiaojun, Wang Qingbin, Dai Liming, et al. Paleogene fault activities and their control over sedimentation at southeastern margin of Qinnan Sag, northern Bohai Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(6): 1059-1067.
- [11] 董大伟, 李理, 刘建, 等. 冀中坳陷中北部新生代构造演化特征

- [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 771–780.
- Dong Dawei, Li Li, Liu Jian, et al. Cenozoic tectonic evolution in the north-central Jizhong Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 771–780.
- [12] 蒋有录, 刘培, 宋国奇, 等. 渤海湾盆地新生代晚期断层活动与新近系油气富集关系[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 525–533.
- Jiang Youlu, Liu Pei, Song Guoqi, et al. Late Cenozoic Faulting activities and their influence upon hydrocarbon accumulations in the Neogene in Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 525–533.
- [13] 田崇鲁, 李德同, 刘铁铨. 箕状凹陷演化模式及其研究方法探讨——以冀中坳陷早第三纪凹陷演化为例[J]. 地质论评, 1991, 37(2): 107–116.
- Tian Chonglu, Li Detong, Liu Tiejian. The evolutionary model of listric depressions and the method of their study—a case study of the neogen evolution of the central Heibei Downwarp [J]. Geological Review, 1991, 37(2): 107–116.
- [14] 康洪全, 李明刚, 贾怀存, 等. 大型控盆边界正断层活动性评价方法及应用[J]. 断块油气田, 2017, 24(3): 307–310.
- Kang Hongquan, Li Minggang, Jia Huaiyun, et al. Evaluation method of large boundary normal fault activity and its application [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(3): 307–310.
- [15] 宋廷光. 同沉积逆断层的发育特点及油气聚集条件分析[J]. 青海地质, 1997, 6(2): 6–13.
- Song Tingguang. Properties of syndimentary reverse faults and petroleum accumulation [J]. Geology of Qinghai, 1997, 6(2): 6–13.
- [16] 于翠玲, 曾溅辉. 断层幕式活动期和间歇期流体运移与油气成藏特征[J]. 石油实验地质, 2005, 27(2): 129–133.
- Yu Cuiling, Zeng Jianhui. Features of fluid migration and hydrocarbon accumulation in the active and intermittent stages of fault episodic activities [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(2): 129–133.
- [17] 徐子英, 孙珍, 彭学超. 珠江口盆地白云凹陷反转构造发育特征[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(4): 394–400.
- Xu Ziyang, Sun Zhen, Peng Xuechao. Development characteristics of inverted structures in Baiyun Sag in Pearl River Mouth Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(4): 394–400.
- [18] 阳怀忠, 任建业, 陆金波. 东营凹陷负反转构造样式及其运动学特征[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2009, 34(3): 493–501.
- Yang Huaizhong, Ren Jianye, Lu Jinbo. Tectonic styles and kinematic characteristics of negative inversion structure in Dongying Depression [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2009, 34(3): 493–501.
- [19] 高丽明, 何登发, 桂宝玲, 等. 东营凹陷民丰洼陷边界断层三维几何学及运动学特征[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(5): 546–553.
- Gao Liming, He Dengfa, Gui Baoling, et al. 3D geometrical and kinematic characteristics of boundary faults in Minfeng subsag, Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(5): 546–553.
- [20] 陈哲龙, 柳广弟, 卢学军, 等. 二连盆地反转构造反转程度定量研究及对油气成藏的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 4136–4145.
- Chen Zhelong, Liu Guangdi, Lu Xuejun, et al. Quantitative study on inversion degree of inversion tectonics and its impact on hydrocarbon accumulation in Erlian Basin, Northern China [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(11): 4136–4145.
- [21] 刘新月, 常波涛, 孙连浦, 等. 反转构造的反转程度及其与油气聚集的关系[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(2): 53–55.
- Liu Xinyue, Chang Botao, Sun Lianpu et al. Reversal degree of reversal structures and its relation with hydrocarbon accumulation [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(2): 53–55.
- [22] 宋廷光, 于百莲, 韩殿杰, 等. 正反转构造的类型和特点[J]. 地球科学, 1995, 20(3): 271–275.
- Song Tingguang, Yu Bailian, Han Dianjie, et al. On classification and characteristics of positive inverted structures [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1995, 20(3): 271–275.
- [23] 付宪弟, 马世忠, 孙雨, 等. 松辽盆地南部孤店断层活动性分析及其控藏作用[J]. 大庆石油学院学报, 2010, 34(2): 21–25.
- Fu Xiandi, Ma Shizhong, Sun Yu, et al. Analysis of the activity and its role in controlling reservoir accumulation of Gudian fault of southern Songliao Basin [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2010, 34(2): 21–25.
- [24] 李丕龙. 陆相断陷盆地缓坡带油气运聚规律研究——以惠民凹陷南坡为例[D]. 兰州: 中国科学院研究生院(兰州地质研究所), 2002.
- Li Pilong. Research on rule of oil-gas migration and accumulation in the gentle slope of terrestrial fault basin—Take an example of south slope of Huiming sag [D]. Lanzhou: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Lanzhou Institute of Geology), 2002.
- [25] 吴智平, 李伟, 郑德顺, 等. 沾化凹陷中、新生代断裂发育及其形成机制分析[J]. 高校地质学报, 2004, 10(3): 405–417.
- Wu Zhiping, Li Wei, Zheng Deshun, et al. Analysis on features and origins of the Mesozoic and Cenozoic faults in Zhanhua Sag [J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10(3): 405–417.

(编辑 张亚雄)