

doi:10.3799/dqkx.2017.048

沉积盆地断裂趋势带形成演化及其控藏作用

王伟锋¹, 周维维², 徐守礼³

1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 广东广州 510301

3. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100037

摘要: 断裂趋势带是指盆地沉积盖层内的弱变形构造带, 属于断裂带形成演化早期或中期阶段的产物。沉积盆地断裂趋势带隐蔽性较强, 识别标志不明显, 往往被忽视, 因而在断裂趋势带上未发现油气藏的区域应该是未来油气勘探值得重视的领域。根据断裂趋势带的规模可将其划分为: (1) 圈闭级断裂趋势带, 特征是多个雁列式断块、弧形断块或者复合型断块圈闭呈线状排列组成; (2) 洼陷级断裂趋势带, 表现为雁列式展布的多条断裂或褶皱, 其间由小断层断续相连; (3) 凹陷级断裂趋势带, 表现为洼陷、凸起、沉积相带或圈闭等构造单元呈线状断续相间排列; (4) 坳陷级断裂趋势带, 属于区域性隐性断裂, 一般表现为沿固定方向基底埋深突变、沉积盖层厚度突变、沉积相带突变等特征; (5) 盆地级断裂趋势带, 表现为成排成带的低幅度构造定向延伸组合成的大规模鼻状褶皱带或大型低幅度隆起。另外, 结合构造物理模拟实验建立了基底断裂走滑型断裂趋势带的5阶段演化模式分析认为, 断裂趋势带油气聚集模式可以概括为6种: 雁列状断块聚集模式、带状断块聚集模式、雁列状褶皱聚集模式、平行状复合圈闭聚集模式、网格状复合圈闭聚集模式、环状复合圈闭聚集模式。

关键词: 断裂趋势带; 基底断裂; 盖层断裂; 走滑断裂; 雁列式构造; 弱变形趋势带; 沉积学; 石油地质。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2017)04-0613-12

收稿日期: 2016-08-10

Formation and Evolution of Concealed Fault Zone in Sedimentary Basins and Its Significance in Hydrocarbon Accumulation

Wang Weifeng¹, Zhou Weiwei², Xu Shouli³

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Chinese Academy Sciences, Guangzhou 510301, China

3. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100037, China

Abstract: Concealed fault zones are a type of weak deformation fault zones that form in sedimentary covers and have expressive forms of faults that show in the early-middle stage of their formation and evolution processes. It can be found by reservoirs, sedimentary facies, sags (depressions) and ridges ranged regularly. Concealed fault zones are supposed to be potential direction for future exploration since reservoirs are usually distributed in concealed fault zones, displaying en-echelon, string or belt patterns. On the vacant area of concealed fault zones should be worthy of oil and gas exploration area in the future. According to the scale, concealed fault zones are classified into 5 types in this paper: (1) the trap scale concealed fault zone consists of a series of en echelon fault blocks, curved blocks or compound blocks in line; (2) the sub-sag scale concealed fault zone composed of a lot of faults and folds, with the distribution of echelons and string of many small faults; (3) the sag scale concealed fault zone showing that there is an intermittent string of sub-sags, ridges, sedimentary facies or traps; (4) the depression scale concealed fault zone identified by the mutation of basement depth, the thickness of the sedimentary cover and sedimentary facies, belonging to regional-concealed fault; (5) the basin scale concealed fault zone characterized by large-scale nosing folds or low-amplitude ridges ranged in defined rows. In addition, the evolution model of concealed fault is established under the evolution of

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41340008)。

作者简介: 王伟锋(1958-), 男, 教授, 主要从事含油气盆地地质构造、油气储层地质、油藏描述、油气地质工程等领域的研究和教学工作。

ORCID: 0000-0003-1497-4431. E-mail: wwf_1958@163.com

引用格式: 王伟锋, 周维维, 徐守礼, 2017. 沉积盆地断裂趋势带形成演化及其控藏作用. 地球科学, 42(4): 613-624.

transensional regional stress field and basement fault activities combined with the structural analogue experiments. It is found that concealed fault zones have controlled the accumulation of the oil and gas in the following six patterns: en echelon fault block accumulation pattern, banded fault block accumulation pattern, en echelon fold accumulation pattern, an accumulation pattern of parallel combination traps, an accumulation pattern of grid combination traps, an accumulation pattern of circularity combination traps.

Key words: concealed fault zone; basement fault; overburden fault; strike-slip fault; en-echelon; weak deformation fault; sedimentology; petroleum geology.

构造物理模拟实验表明,盆地基底先存断裂走滑活动引起沉积盖层断裂的产生过程是:早期发育弱雁列式裂缝、裂缝密度和规模扩大、中期主断裂面(P断裂)断续出现、主断裂面贯通、后期主断裂面错动.盆地盖层断裂的形成是裂缝稀疏、裂缝密集、裂缝扩大、裂缝贯通的过程,也是断裂带变形由弱到强、主断面从无到有、由隐性到显性的过程.现在能够识别的断层绝大多数属于显性断层,具有显著的位移和明显的断裂面(带).断裂发育早、中期的盖层弱变形构造带应该是沉积盆地客观存在的构造现象.从成因上分析,断裂趋势带是区域或局部构造应力场、基底断裂走滑、基底差异升降、地块(潜山)旋扭等因素影响下在沉积盆地盖层中产生的弱变形构造带.实例研究表明:断裂趋势带是沉积盆地盖层中普遍存在的一种断裂构造,属于断裂形成演化初期或中期阶段的产物,一般没有明显的断裂面,有断裂面时往往呈线状断续分布、时隐时现,断裂带与周围未变形的正常地层呈渐变过渡关系,一般通过线状分布的次级构造等特征进行识别.小型的断裂趋势带断距一般很小,地震剖面上无法识别,往往被忽视.中、大型断裂趋势带常常控制沉积相,凹陷、凸起有规律分布,由于没有断裂面(带)的直接证据,也未引起足够多的重视.例如,鄂尔多斯盆地沉积盖层中一般认为断裂构造不发育(邱领军,2006),但是,目前研究人员逐渐认识到盆地基底多组断裂的活动使盖层产生了多个方向的弱变形断裂趋势带,并且这些断裂趋势带控制了盆地的油气藏的形成与分布.苏北盆地金湖、高邮凹陷成串成带分布的油藏带,实际上受到一些不存在主破裂面的小型隐蔽性断层的控制,据此可识别出与基底断裂对应的北东、北西、南北向3组断裂趋势带(王伟锋等,2014).断裂趋势带有重要的地质意义:渤海湾盆地形成了北东向、北西向断裂趋势带,具有重要的控藏、控震作用(周维维等,2014a);鄂尔多斯盆地北东向基底断裂中生代以来的“隐性”活动控制了陇东—志靖和安塞地区的带状区域内,已发现的大油气田和每年新增探

明储量也在该区带获得(汪泽成等,2005);准噶尔盆地侏罗系—白垩系油气主要聚集到二叠纪“古梁”上成藏(胡素云等,2006),已发现的石南、石西、莫北和彩南油气田均沿NE、NNE向构造带呈规律性排列,与NNE向基底断裂的分布基本对应,而“古梁”成为河道的本质是基底断裂“隐性”活动形成的断裂破碎带控制了物源水系的分布;四川盆地川中地区须家河组主要气田呈现出“三横两竖”网状分布特征,经查明北西向的气藏带受到一些断断续续分布的小断层和低幅度构造的控制(汪泽成等,2008),并且这些隐蔽性构造很明显受基底断裂分布的控制.威利斯顿、北海等含油气盆地(Gibert *et al.*, 1974)也具有前述的构造变形及控藏特征.

Morley(1999)应用库伦准则、贝叶律建立了基底断裂活动性判据,认为应力莫尔圆中介于破裂线与先存断裂活动线之间形成的矩形区域为一不存在统一破裂面的透入性构造(penetrative structure),即断裂趋势带. Dooly(2012)针对板内走滑构造物理模拟成果进行了系统研究和总结,他认为多种区域应力场作用下,断裂体系形成的早期,平面上都会形成一些零星分布的小断层,似有似无的分布在雁列式断裂带之间,其差别在于 σ_1 方向、R剪切的角度以及断裂趋势带形成以后断裂体系的形成、扩展方式.应用二维离散元模型去观察陡立的(倾角为 70°)基底正断层在断距连续递增的过程中引起的盖层构造变形,可得到了伸展应力场作用下断裂趋势带形成演化过程,Hardy(2011, 2013)称之为离散断裂带(discrete fault zone),他认为在离散断裂带的活动在影响着圈闭形成和流体运移.多数断裂,尤其是生长断裂并不是以一条破裂面的形式存在,通常是以宽度不一的断裂带形式存在, Mollema(1996)将其称为形变带(deformation band);Bellahsen(2005)在其物理模拟实验中发现基底先存构造会以多种形式在盖层中复活,这些呈带分布的小断层或者褶皱是深走滑断裂的派生构造,他将其称为继承性弱变形趋势带(inherited weakness fault);

在里德尔走滑实验中,他认为盖层中的断层实际上是二次构造现象,先存基底断层控制和改变了这些断层及附近的局部构造应力场。

断裂趋势带发现以后,国内外学者进行了初步的探索,通过分析其特征及形成机制,取得了一定进展,但仍存在一些不足;目前还没有建立起一套有效识别方法和技术;断裂趋势带形成机制与演化研究还很薄弱;控藏作用还仅限于现象的描述上.因此,建立断裂趋势带理论与识别方法不仅对学科发展有重要的理论价值,而且对指导油气勘探有重要的现实意义。

1 断裂趋势带的类型及特征

前期研究(王伟锋等,2014;周维维等,2014b)结合国内外研究成果(Gibert,1974;Sylvester,1988;Mollema *et al.*,1996;Morley,1999;Ferrill *et al.*,2000;Bellahsen *et al.*,2005;胡素云等,2006;汪泽成等,2008,2009;Hardy,2011,2013;Dooley,2012;Li *et al.*,2012;王建民等,2013)表明:断裂趋势带有多种类型按力学性质可以划分为挤压型、拉张型、走滑型、压扭型和张扭型等;

按成因可以划分为基底断裂走滑型、基底差异升降型、地块(潜山)旋扭型和应力场控制型,即基底活动型和盖层滑动型;按地质作用可以划分为调节型、控凹型、控相型、控藏型、控震型等;按规模可划分为圈闭级、洼陷级、凹陷级、坳陷级和盆地级等.本文采用规模分类方案,结合成因,选择典型的断裂趋势带,阐述其识别标志及特征。

1.1 圈闭级断裂趋势带

是指控制数个圈闭分布的隐性断裂.一般是由一系列雁列式断块、弧形断块或者复合型断块呈线状排列构成的断裂趋势带,如果具备油源、储集和输导等条件,可以形成串珠状、雁列状、条带状分布的油藏,从而识别断裂趋势带的存在.如东营凹陷王家岗和八面河构造带,实际上是基底断裂控制的盖层断裂趋势带,规模较小,断裂宽度小于1 km,长度小于15 km,由北东向基底断裂古近系右行走滑活动产生。

王家岗构造带断裂系统主要由一系列近东西向和北东向展布的正断层构成.北东向断层主要分布在构造带侧翼,为南东倾.近东西向断层分布在主构造带上,主要为北倾,呈弧形弯曲的特征,整体呈雁列式展布,断鼻圈闭各自独立成串珠状分布在断裂趋势带上(图1a,1c),油气呈雁列状断块聚集模式。

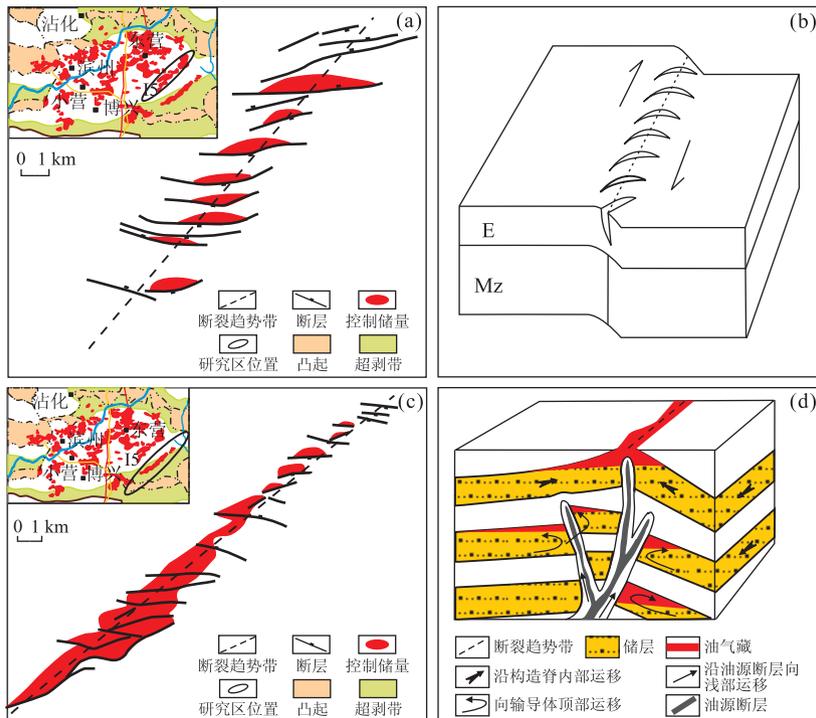


图 1 圈闭级断裂趋势带特征及结构模式

Fig. 1 Characteristic of the trap scale concealed fault zone

a. 东营凹陷王家岗断裂趋势带;c. 东营凹陷八面河断裂趋势带;b,d. 圈闭级断裂趋势带构造模式

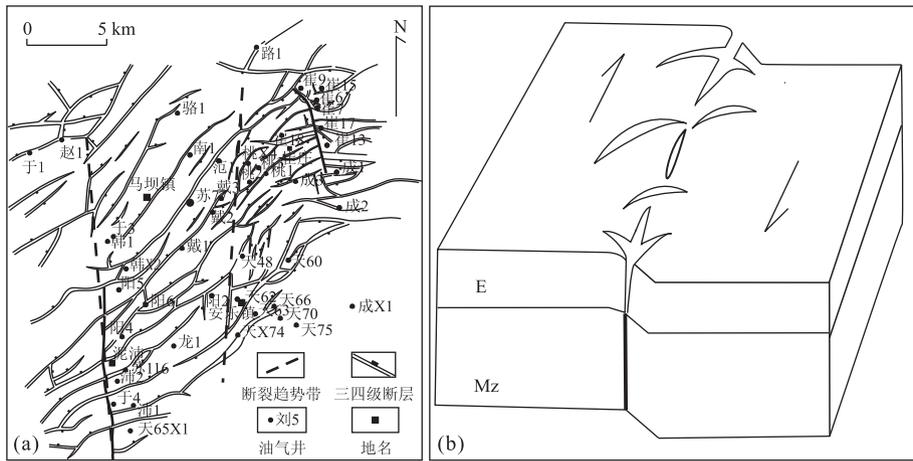


图 2 洼陷级断裂趋势带特征及结构模式

Fig. 2 Characteristic of the sub-sag scale concealed fault zone

a. 金湖凹陷崔庄断裂趋势带构造特征; b. 断裂趋势带构造模式

这种特征表明,断裂趋势带处于演化早期阶段,构造变形较弱,主断面还未形成。

八面河构造带为近东西向近直线状小断裂呈雁列式展布,反向屋脊断块圈闭呈带状聚集(图 1b, 1c),表明主断面已经逐渐形成,多数圈闭之间已经相互连通,油气呈带状断块聚集模式。其演化程度较王家岗断裂趋势带更高。

1.2 洼陷级断裂趋势带

洼陷级断裂趋势带形成于凹陷中的次凸、次洼等构造单元中,主要控制砂体和储层分布。金湖凹陷崔庄地区根据断续呈串状的小断层和断块一岩性油藏分布可以识别出近南北向的两条规模相近、成因相同的断裂趋势带。断裂趋势带宽度较窄为 2~5 km,长度为 18~20 km,形成于区域右行走滑应力场的东西方向挤压应力分量,在成因上为区域构造应力型断裂趋势带。断裂趋势带上近东西向小断层一致东倾,断续分布其间的小断层在某些段落已经连接成串状,具有显著的破裂面,形成局部显性断裂。过崔庄断层的断裂趋势带由崔 18、崔 17、崔 9、崔 6、崔 7 等断块油藏组成,它们近南北向呈串珠状分布(图 2a, 2b)。过泥沛的断裂趋势带北段隐蔽,南段已经形成压扭性显性断裂带。近东西向平行的小断层呈雁列式展布,并与南北走向的压扭性断裂交叉形成了一系列南北向的圈闭带。较圈闭级断裂趋势带相比,该断裂趋势带上的隐蔽性小断层已经具有实际意义上的断距,地震剖面上具有清晰的同相轴错段,局部地段已经相互连接形成规模较大的显性断裂。

1.3 凹陷级断裂趋势带

凹陷级断裂趋势带形成于凹陷或者凸起等同规

模的构造单元,控制了凹陷内次级构造单元以及沉积相带的展布。根据基底断裂展布、小断层分布规律、沉积相带展布、油藏分布、相干体切片等研究成果,笔者在垦东凸起识别出多条北北东向凹陷级断裂趋势带,它们沿着走向具有不同的构造变形类型,长为 24~30 km,宽为 6~10 km,成因分类属于地块旋扭型。断裂趋势带在浅部盖层中表现为一条断续分布的小断层带(图 3a)。这条小断层带位于垦东南断层的转折端,将垦东凸起分成东西两个部分,隐性断裂西侧断层走向近北东,东侧断层走向近东西向。断裂趋势带整体为北北东走向,分为南、中、北 3 段,南段走向北北东,由一系列近北东向北倾或南倾的张性小断层形成雁列式断层带;中段走向北北东,表现为一系列北东向小断层彼此平行,呈雁列式分布,并有北北东向断层断续相连;北段走向近北北东,表现为较大规模的北东向断层雁列式展布。断裂趋势带中段剖面自下而上主要表现为单根插入基底的深大断裂、沿主断裂撒开的花状构造、沿花状构造外延扩散的断裂破碎带 3 个部分(图 3b)。断裂趋势带上形成了古 2、孤南 25、孤南 29、孤南 451、孤南 32 等断块油藏构成的北北东向的油藏带。

1.4 坳陷级断裂趋势带

坳陷级断裂趋势带属于区域性断裂构造,一般表现为沿固定方向基底埋深突变、沉积盖层厚度突变、沉积相带突变等特征,多由基底断裂走滑或者差异升降活动产生。黄骅—东明断裂趋势带在规模上属于坳陷级,成因上为基底断裂走滑型断裂趋势带,其长度大于 100 km,宽度 20~30 km。该断裂趋势带两侧深部盆地结构、盖层断层倾向、走向都具有差异

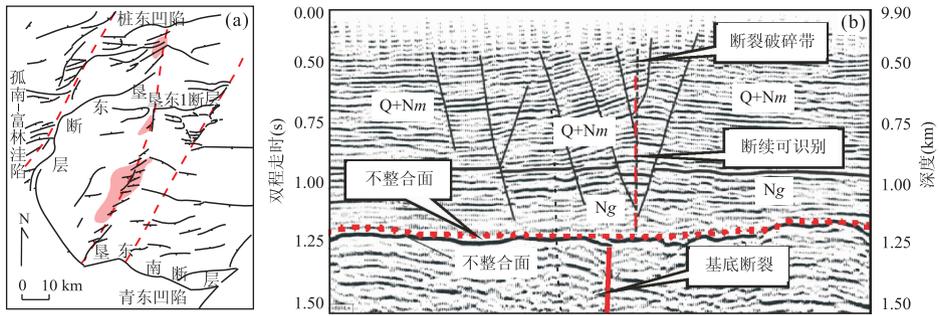


图 3 凹陷级断裂趋势带特征

Fig. 3 Characteristic of sag scale concealed fault zone

a. 凹陷级断裂趋势带平面特征(渤海湾盆地东部 T1构造图); b. 凹陷级断裂趋势带剖面特征(剖面位置如 a 黑色虚线所示)

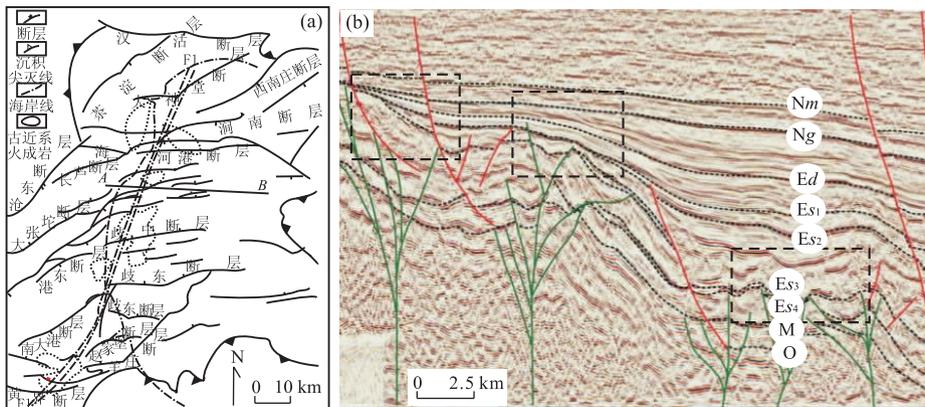


图 4 坳陷级断裂趋势带特征

Fig. 4 Characteristic of depression scale concealed fault zone

a. 黄骅坳陷中区断裂趋势带平面特征; b. 断裂趋势带剖面特征(方框内指示断裂趋势带发育区)

性. 断裂趋势带西侧为北断南超的多米诺型单断箕状半地堑式结构, 东侧为近南北向对掉的双断型地堑式结构; 断裂趋势带西侧的显性断层走向为 NE 向, 倾向以 SE 向为主; 东侧的显性断层近 EW 向延伸, 且倾向以正北向为主, 两侧断层一般都终止于该构造带(Li *et al.*, 2012)(图 4a).

断裂趋势带垂向上深部呈显性而浅部表现为隐性特征, 由深到浅表现为近直立的基底断裂、花状构造以及顶端形成的平缓褶皱, 局部形成挠曲坡折带或者断距不明显的构造坡折带. 过断裂趋势带的剖面上自西向东发育了高、中、低 3 个依次排列的古台阶. 沙四段、沙三段沉积末期地层发生明显的向花状构造端部方向的褶皱, 这说明深部的基底断裂在两个时期除发生水平方向的扭动作用外同时进行垂直升降活动, 活动结果是形成了具有调节构造性质的断裂趋势带(图 4b).

1.5 盆地级断裂趋势带

盆地级断裂趋势带是指对盆地构造格局、沉积

体系分布、大型油气聚集带分布都具有控制作用的弱变形趋势带. 根据重磁、地震资料, 以及构造格局、地层、沉积体系、低幅度褶皱等的分布数据, 在鄂尔多斯盆地陇东—志靖地区笔者识别出成排成带的低幅度构造组成的基底升降型断裂趋势带(图 5a, 5b). 基底升降型断裂趋势带是指基底差异升降活动引起的上覆沉积盖层变形形成的低幅度构造或断层相关褶皱. 航磁、重力和大地电磁测深大剖面等资料解译表明鄂尔多斯盆地存在东西向、北东向及北西向 3 组基底断裂, 古生代以来的印支运动、燕山运动形成了稳定隆升的构造背景, 盆地内部构造变形微弱(汪泽成等, 2005), 北东向基底断裂扭动形成了大量的盆地级低幅度构造呈北东向雁列式展布构成断裂趋势带(王建民等, 2013). 组成断裂趋势带的低幅度构造具有规则的形态和一致的延伸方向. 构造轴呈近东西向, 平缓西倾, 呈长鼻状, 两翼大致对称. 鼻隆与鼻凹部分形成一组或一排起伏明显的低幅度构造, 构造脊线局部具有轻微的弯转或者扭

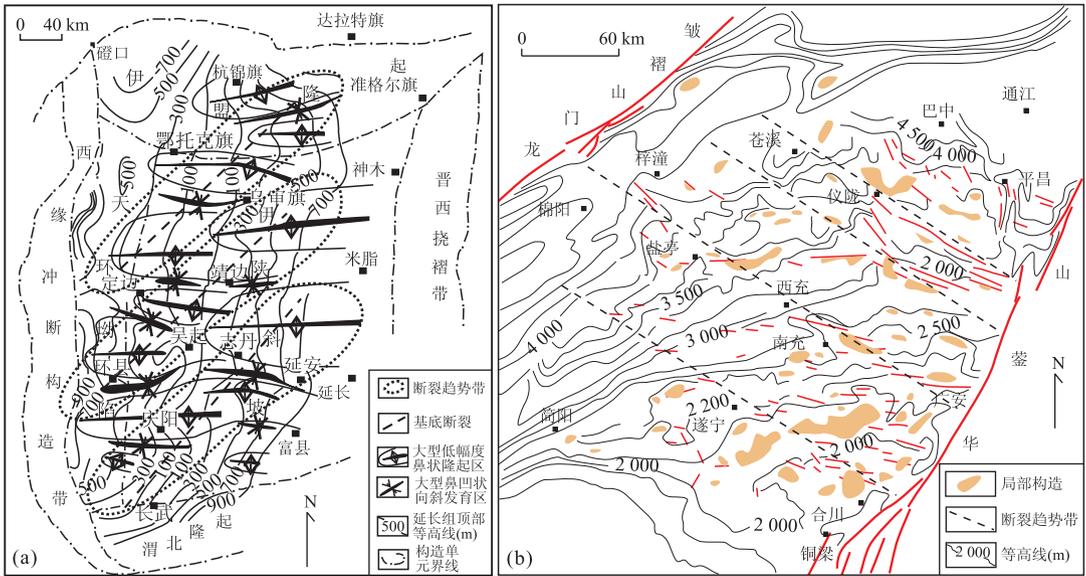


图 5 盆地级断裂趋势带特征

Fig. 5 Characteristic of basin scale concealed fault zone

a. 鄂尔多斯盆地基底断裂、沉积相、油藏叠合图, 据王建民等(2013)改动; b. 四川盆地须家河组断裂趋势带, 据汪泽成等(2008)

曲. 单排低幅度构造长度近 30~100 km, 构造面积约 50~260 km², 油气呈带状分布在雁行式的低幅度构造上, 油气呈雁列状褶皱聚集模式.

通过对川中地区的地震资料解析, 在须家河组底界识别出一系列小断层、褶皱等中低幅度构造, 根据小断层断续分布的排列方式、构造转折点以及局部构造的长轴伸展方向等可以识别出遂宁—合川、广安—南充、营山—双河、税家槽—仪陇等多条基底断裂走滑型断裂趋势带(汪泽成等, 2008). 它们由一系列北西向小断层控制的低幅度构造圈闭组成, 油气呈平行状复合圈闭聚集模式.

2 沉积盆地断裂趋势带演化模式

断裂趋势带的形成都与基底断裂活动或者构造应力场密不可分, 有些难以识别, 有些特征明显, 这与它们所处的演化阶段不同有关. 从圈闭级到盆地级表现为从“隐性”逐渐向“显性”过渡. 为了探讨断裂趋势带的形成和演化阶段, 笔者在上述实例分析基础上进行了构造物理模拟实验.

实验结果表明: 基底、应力、应变(Li et al., 2012) 是控制隐性断裂形成演化的 3 个条件. 在基底断裂活动强度不断增加的条件下, 盖层断裂经历了由“隐性”到“显性”的多阶段变化.

2.1 张扭性应力场作用下断裂趋势带形成演化

2.1.1 早期弱雁列式隐性期(诱导裂缝期) 早期

弱雁列式隐性期(诱导裂缝期): 该阶段近东西向的破裂规模较小, 破裂面直立, 断距不明显(图 6a). 断裂趋势带内部发育与走向平行的张裂隙, 在走向和倾向上未形成贯通的主滑动面.

2.1.2 早中期强雁列式隐性期(局部破裂期) 外力持续作用下, 基底断裂活动加剧, 雁列状 R 剪切缝产生断距, 断面开始倾斜, 形成真正意义的小断层. 断裂趋势带内部裂隙规模增大形成局部的破裂面, 但未切穿盖层. 该阶段重要标志是出现了低角度剪切缝(图 6b). 如东营凹陷的王家岗、八面河构造带可作为这个阶段的实例.

2.1.3 中期断续状隐—显期(主破裂期) 中期断续状隐—显期(主破裂期): 随基底走滑作用进一步加剧, 盖层的扭动与撕裂作用加强, 雁列式 R 剪切规模加大的同时, 低角度同向、反向(P) 两组剪切缝逐渐出现, 它们被限制在雁列式 R 剪切断层之间, 或间隔出现, 或连续发育形成局部显性断层(图 6c). 金湖凹陷西斜坡地区、崔庄、泥沛地区断裂趋势带都处于断续状隐—显期.

2.1.4 中后期串状显—隐期(主滑动期) 中后期串状显—隐期(主滑动期): 该阶段断续分布的两组低角度剪切缝逐渐合并形成规模较大的 Y 剪切. 早期的雁列式 R 剪切被切断成为主断层的分支断裂(图 6d), 构成入字型构造. 断层属性明显, 已经属于显性断裂阶段. 渤海湾垦东断裂趋势带可以作为这个时期的典型实例.

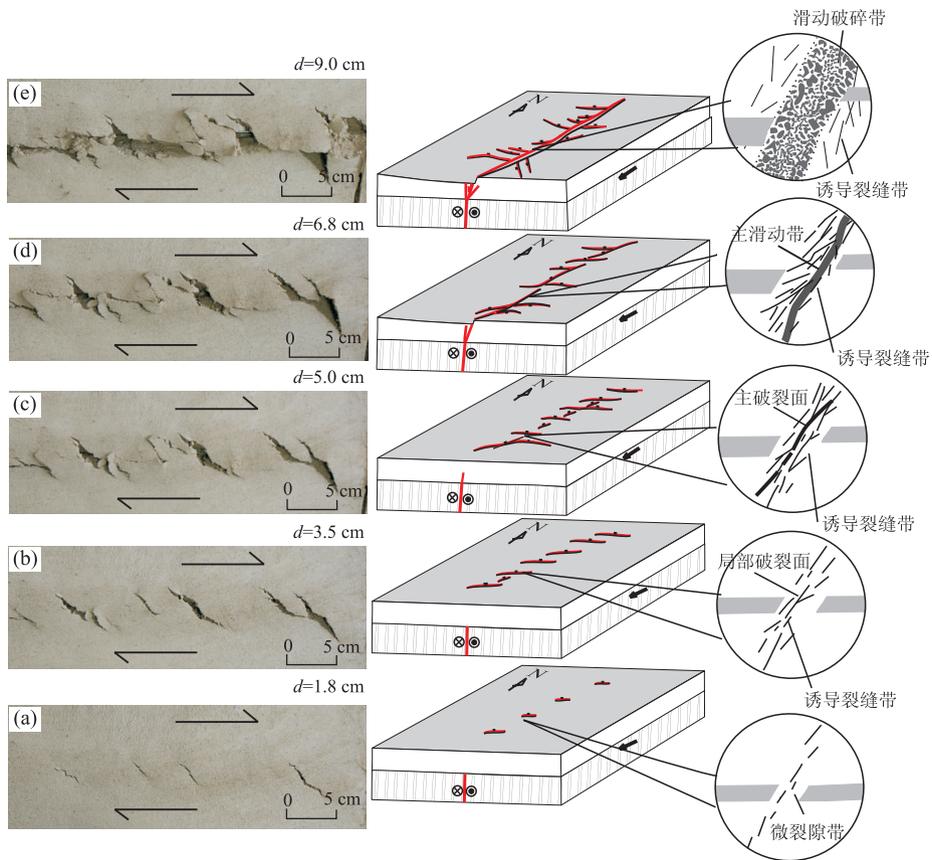


图 6 基底断裂走滑型断裂趋势带演化过程

Fig. 6 Evolution of basement strike-slip type concealed fault zone

a. 早期弱雁列式隐性期(诱导裂缝期); b. 早中期强雁列式隐性期(局部破裂期); c. 中期断续状隐—显期(主破裂期); d. 中后期串状显—隐期(主滑动期); e. 后期张扭性走滑断裂(滑动破碎带)

2.1.5 后期张扭性走滑断裂(滑动破碎带) 后期张扭性走滑断裂(滑动破碎带): 断裂趋势带演化末期, 主断裂显著走滑错动, Y 剪切贯通主位移带(PDZ), 断裂带宽度变化显著, 下部已经与基底断裂连为一体, 剖面上负花状构造发育完整(图 6e), 断裂带内夹持的雁列式断块构成走滑伸展双冲构造, 在断裂两侧派生大量分支断层. 东营凹陷的石村断裂带、金湖凹陷的石港断裂带等都可以作为该演化阶段的实例.

一般来说, 断裂趋势带形成演化可以划分为不同的阶段, 但很多实例分析表明有些断裂趋势带虽然经历了长期发育, 但始终处于早期阶段, 如鄂尔多斯盆地的弱变形趋势带, 有些断裂趋势带规模较小但演化程度较高, 如东营凹陷南斜坡八面河构造带.

2.2 断裂趋势带形成的力学机制

基底断裂走滑型隐性断裂物理模拟表明, 其力学机制可以用走滑派生构造理论得以解释. 模型中首次出现了雁列式的 R 剪切, 走向与基底断裂轨迹

呈 23° 相交, 如果在模型表面覆盖浸水毛边纸, 可以观察到 R' 反向里德尔剪切, 走向与基底断裂轨迹约 67° 相交. 与 Sylvester(1988) 所得到的简单剪切模式不同的是, R 与 R' 并未同时出现, 分析原因有两点: 首先 R' 处于不利的活动方位, 为了保持共轭断层区域面积平衡, 必然是与基底走滑方向小角度相交的一组优先活动, 这一点在 X 型断层演化恢复研究中已经得到论证(Ferrill *et al.*, 2000); 其次也与本实验材料的物理性质、含水率、以及模型表面的湿度都有关(Atmaoui *et al.*, 2006).

随着位移增加, R 剪切沿着基底断裂走向传播, 低角度同向剪切缝(P 剪切) 出现, 与走滑呈方向相反的 15° 方向($\alpha = -15^\circ$). 位移进一步增加至 5 cm, P 剪切方位形成一系列相互连接的剪切透镜体组成的断裂趋势带(图 7), 由于粘土中高岭土成分较高, 塑性较强, P 剪切始终未发生破裂, 实验现象不明显, 但实验过程可以显著地观察到 P 剪切形成的剪切透镜体断续分布于 R 剪切之间, 对早先形成 R 剪

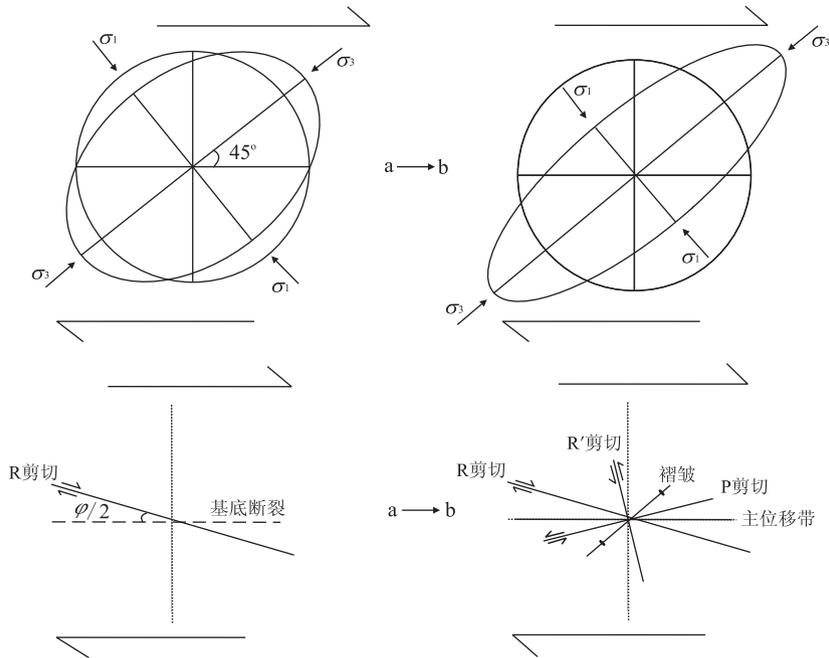


图 7 断裂趋势带形成演化的应力机制

Fig. 7 Mechanism of the stress about formation and evolution in concealed fault zone

a. 代表初始隐性活动期应力状态及派生构造; b. 代表显性断裂形成期应力状态及派生构造

切之间的主应力局部增加和旋转具有调节作用,该时期与基底断裂平行的 Y 剪切逐渐形成. 继续增加位移量至 9 cm, Y 剪切贯穿整个断裂趋势带形成上下贯通的主位移带(PDZ), 结束隐性期, 形成走滑断裂带, 构成完整的走滑派生构造体系. 多组实验表明: 盖层厚度以及走滑剪切强度对断裂趋势带的宽度、小裂缝的数量、断裂性质以及断裂趋势带中剪切裂缝的空间分布具有重要影响, 这对圈闭的形成和油气的输导都具有重要意义, 后续的实验将会围绕断裂趋势带时空分布规律性以及形成演化的主控因素做深入探讨.

3 控藏作用分析

断裂趋势带的活动影响了盆地沉积格局、控制了生烃凹陷的分布化初期的低洼地带、坡折带至演化中后期的控盆控藏断裂, 是汇聚水系和砂体沉积的区域, 断裂带演化的不同阶段均发育了不同类型的油气圈闭. 断裂趋势带内部裂缝的发育演化过程揭示了其对储集层物性等方面的改造作用. 因此断裂趋势带形成演化对成藏具有重要的控制作用.

3.1 对烃源岩成熟度的指示意义

断裂趋势带是基底断裂活动形成的地带, 基底断裂活动区是地壳的薄弱地带, 有利于深部热源向

上传递, 使得断裂趋势带发育区具有相比其他地区较高的热异常, 加速了有机质生烃演化.

鄂尔多斯盆地侏罗纪末—早白垩世的高地热场与基底断裂活动密切相关, 根据盆地模拟恢复的古地温研究表明, 断裂趋势带密集发育区古地温较其两侧高 20~30 °C, 中生界和古生界烃源岩的镜质组反射率值也比两侧高 0.2%~0.3% (汪泽成等, 2005). 成藏史研究表明, 在断裂趋势带发育区, 延长组烃源岩在白垩世末已达到成熟阶段, 石油可大量生成并聚集成藏. 延长组生烃灶总体走向为北西向, 但在低幅度构造发育区异常扩大, 与断裂趋势带发育吻合. 说明断裂趋势带的分布对烃源岩的成熟度有指示意义.

3.2 改造古地貌控制砂体分布

断裂趋势带控制了大量的雁列式、断续状小断层带的形成和分布, 二者形成切割、连接等组合关系, 剖面上表现为断阶、地堑等小型显性构造形成的断裂破碎带, 河道冲刷下切就极易取其走向, 沿着断裂趋势带走向形成了沉积物卸载区.

黄骅—东明断裂趋势带经过歧口凹陷的段落控相作用明显, 其中南段基底断裂活动较强, 盖层中形成了张北显性断层, 断裂趋势带向北以左阶雁列式展布, 最北端可以延伸至大神堂断层转折端. 沙三段扇三角洲伸展进入湖盆(图 8), 物源主要来自东北

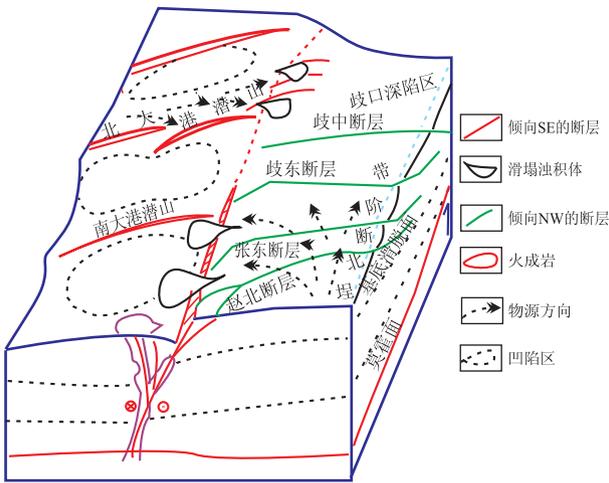


图 8 歧口凹陷断裂趋势带控制沉积体系展布

Fig. 8 The control of concealed fault zone on the distribution of depositional system in Qikou depression
据祁鹏等(2010)

部的燕山隆起和西部的沧县隆起,在沧县隆起短轴方向伸展入湖的三角洲,在湖盆深处形成了远岸水下扇沉积体系(祁鹏等,2010),深湖相显性断裂不发育,北北东向的断裂趋势带局部的影响了古地形,形成断裂破碎带,改变了物源水系的走向,物源水系携带大量的砂体沿着雁列状展布的断裂趋势带沉积下来.埕宁隆起物源区伸展入湖的扇体,也主要沿着北北东向生长,这与歧口凹陷断裂趋势带分布相吻合.因此,断裂趋势带形成区也是优质储层发育区.

3.3 控制隐蔽圈闭形成与分布

本文研究表明:在断裂趋势带不同演化阶段主要形成了 5 种类型的隐蔽性圈闭.第一类是基底断裂活动在盖层中形成的断续分布的北东向小断层,它们被限制在近东西向显性断层之间构成的交叉型隐性断块圈闭(图 9a),如金湖凹陷汉涧地区天 89、天 X83、天 X79 等多个含油断块呈北东向展布,圈闭一侧被一系列北倾的近东西向张性正断层平行分

隔,另一侧则由北东向隐性断层连接而形成圈闭.此外,在西部斜坡带上的北西向、南北向断裂趋势带上也发现了这种隐蔽性圈闭.第二类是近东西向与北东东向隐性断层联合形成弧型隐性断块圈闭(图 9b),如金湖凹陷的刘庄含油断块西侧是由多段北东向小断层连接,北侧是由规模较大的北东向断层相连成弧,在弧形内侧上升盘形成圈闭.南湖、卞东、杨家坝、墩塘等油田也形成了同样成因模式的圈闭类型.第三类为二者复合的类型,如汉涧地区的王龙庄油田(图 9c).它是由弧形小断层与近东西向断层组合形成的“入”字型断块圈闭.第四类则是砂岩差异压实或者构造活动强度较低的情况下形成的微构造圈闭,该类圈闭幅度低,含油高度一般较小,如埕东凸起断裂趋势带上的埕东 33 断块.最后一类是断裂趋势带对古地貌改造形成的低幅度坡折带控制的岩性上倾尖灭圈闭,如黄骅拗陷的歧 26 井.

3.4 改善储集层物性

断裂趋势带演化至显性断裂之前,尤其是演化的早-中期阶段,储集层不会形成明显的褶皱或断裂等构造变形,微观结构上表现为发育大量的诱导裂缝带,这对于鄂尔多斯、四川盆地等地区的致密储层物性改造具有重要意义.

鄂尔多斯盆地各层系中广泛分布基底成因型的构造应力裂缝,例如下寺湾侏罗系厚层砂岩大型雁行状节理、绥德县的三叠系 X 型共轭节理(汪泽成等,2005),目前所钻遇的油气显示段均存在裂缝,构造裂缝是沟通孔洞形成优质储层的重要因素,是油气井高产的重要原因.目前资料看,盆地东部断裂趋势带的密集发育区裂缝发育程度要比西部高,且呈北北东向带状分布,形成高渗透带,这与北东向基底断裂长期活动有关,分布范围与鄂尔多斯盆地基底升降型断裂趋势带的分布区域相吻合(图 10a, 10b).因此致密储层发育区识别断裂趋势带是预测

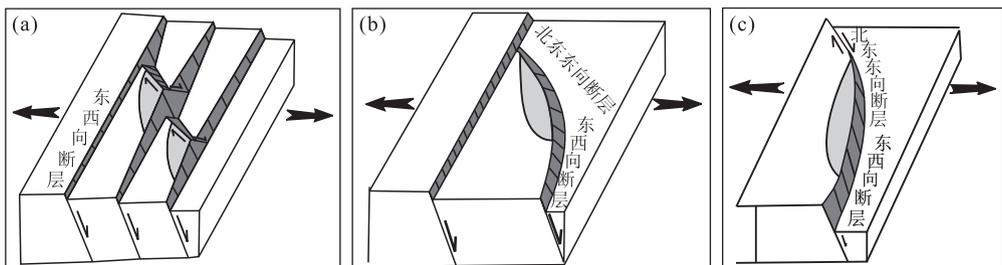


图 9 断裂趋势带圈闭组合模式

Fig. 9 Trap patterns of concealed fault zone

a. 交叉型断块圈闭; b. 弧形断块圈闭; c. 复合型断块圈闭

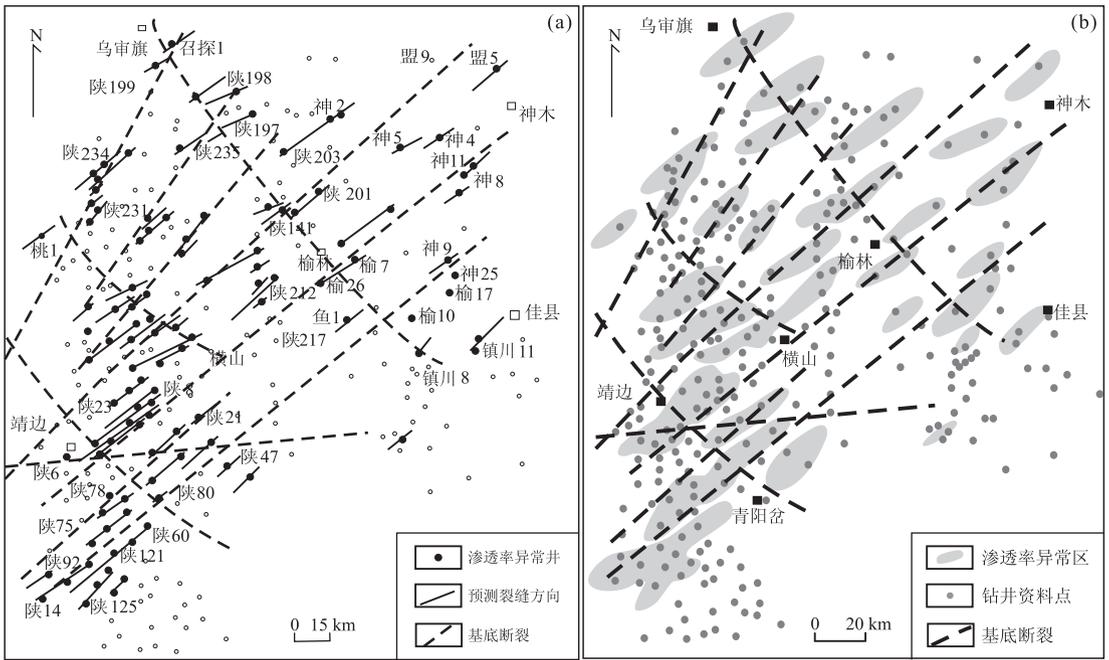


图 10 鄂尔多斯盆地断裂趋势带对输导体系的改造

Fig. 10 The north-east concealed fault zone transformed the petroleum transport system in Ordos basin
a. 鄂尔多斯盆地上古生界裂缝方向预测; b. 鄂尔多斯盆地上古生界渗透率异常平面分布; 据赵文智等(2003)改动

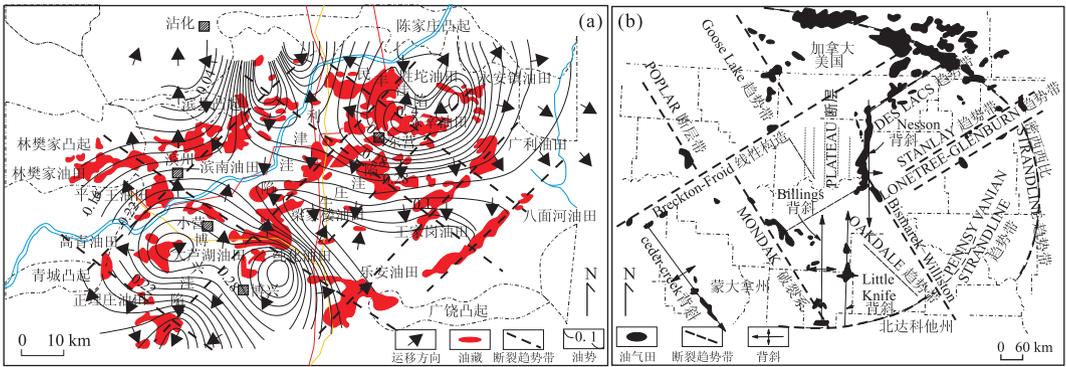


图 11 东营凹陷与威利斯顿盆地油气分布

Fig. 11 The distribution of reservoirs in Dongying sag and Williston depression

a. 营凹陷馆陶组末期流体势、断裂趋势带、油藏叠合图; b. 威利斯顿盆地油藏与断裂趋势带叠合图; 据 Gilbert(1974)改动

“甜点”分布的重要线索. 储集层中的剪切、挤压等构造应力产生的节理以及沿这些微破裂派生的溶蚀孔隙形成良好的物性区带是油气相对高产的主要原因.

3.5 对油气运移的指向作用

首先, 基底断裂活动产生大量裂缝形成断裂趋势带, 裂缝发育带地体膨胀会产生高强度真空区而形成低势区; 其次, 基底隐伏断裂右旋走滑活动可能引起组成断裂趋势带的小地块旋转, 导致局部的引张应力而形成负压异常. 因此, 断裂趋势带多位于势能变化较大的区域和低势能区, 是油气运移指向区.

笔者分析前人研究成果(李云平等, 2005)发现, 由于东营凹陷基底北东、北西向两组基底断裂持续弱活动, 在盖层东发育了北东向、北西向两组断裂趋势带. 从馆陶组沉积末期流体势分布来看, 断裂趋势带多位于低值区和高值内部的相对低值区域(图 11), 从而形成了北东和北西向多个油藏带, 构成了网格状复合圈闭聚集模式. 北美威利斯顿盆地油气除了表现为网格状聚集外, 还有环带状聚集特征(Gibert, 1974).

3.6 对低幅度构造发育的控制作用和油气聚集作用

基底断裂活动除传递给盖层张扭、压扭应力外还

会产生适应盆地结构及古地貌特征的垂直升降运动,形成的成排成带的基底差异升降型断裂趋势带,构成大型的构造脊(图 11a)。基底断裂、盖层断裂趋势带与砂体匹配形成断控砂体型输导脊,如济阳坳陷的垦东凸起断裂趋势带,一端向凹陷延伸倾没,可以有效汲烃,垂向上基底断裂切入古生界,形成潜在的油气运移输导脊。烃源岩成熟,油气在浮力作用下沿基底断裂垂向运移,而后在输导体内部侧向运移,向顶面聚集,最后在脊内(断裂趋势带内)运移聚集成藏。

综上所述,断裂趋势带控制了储集砂体、圈闭带的分布,长期活动的断裂趋势带形成的大量裂缝改善了储集层物性,同时断裂趋势带又是油气聚集的有利场所。断裂趋势带油气聚集模式可概括为:雁列状断块聚集模式(王家岗构造带)、带状断块聚集模式(八面河构造带)、雁列状褶皱聚集模式(鄂尔多斯盆地、塔里木盆地轮台构造带)、平行状复合圈闭聚集模式(四川盆地)、网格状复合圈闭聚集模式(东营凹陷)、环状复合圈闭聚集模式(威利斯顿盆地)这 6 种。

断裂趋势带概念的提出,是对断控为主或者相控为主的勘探理念的完善,旨在提醒地质研究人员在寻找勘探靶区时不要把注意力局限于显性断层以及河、湖相三角洲砂体而忽视了隐蔽性构造因素对油气的控制作用,即首先从区域及局部应力场入手,研究先存基底断裂的活动特点;其次,根据盖层中断裂特征、潜山、凹陷分布、砂体、油藏分布结合地震、测井响应对其综合识别,在此基础上应用模拟实验结合构造特征得到盖层中这些断裂趋势带的分布规律、控制因素、演化模式以及控藏作用进而提供有利勘探目标和靶区。只有把显性与隐性断裂研究相结合,才能事半功倍,进一步加快勘探突破的进程。

4 结论

(1)断裂趋势带是指盆地内的弱变形断裂趋势带,属于断裂带形成演化早期或中期阶段的产物,可以根据基底断裂、油气藏、沉积相带、洼(凹)陷、凸起等地质单元的有规律分布进行识别。

(2)断裂趋势带是区域或局部应力场、基底断裂活动等因素影响下在沉积盆地盖层中产生的具有不同成因及规模的断裂趋势带,它是断裂带的一种类型,多为深走滑断裂的派生构造。

(3)基底走滑型断裂趋势带演化经历了早期弱雁列式隐性期、早中期强雁列式隐性期、中期断续状隐—显期等多个隐性演化期,最终演化为张扭性走

滑断裂,内部结构经历了诱导裂缝带、局部破裂期、主破裂期等 5 个阶段。经历了断裂带变形由弱到强、主断面从无到有、断裂宽度和位移逐渐增加、断裂由隐性到显性的演化过程。

(4)断裂趋势带演化影响了烃源岩成熟度、控制了沉积砂体的分布、隐蔽性圈闭带的形成,改善了储集层物性;油气呈雁列状断块、带状断块、雁列状褶皱等 6 种圈闭聚集模式。断裂趋势带是未来油气勘探的重要领域。

References

- Atmaoui, N., 2006. Development of Pull-Apart Basins and Associated Structures by the Riedel Shear Mechanism; Insight from Scaled Clay Analogue Models. University of Bochum, Doktorarbeit.
- Bellahsen, N., Daniel, J. M., 2005. Fault Reactivation Control on Normal Fault Growth; An Experimental Study. *Journal of Structural Geology*, 27(4): 769—780. doi: 10.1016/j.jsg.2004.12.003
- Dooley, T. P., Schreurs, G., 2012. Analogue Modelling of Intraplate Strikeslip Tectonics; A Review and New Experimental Results. *Tectonophysics*, (574—575): 1—71. doi:10.1016/j.tecto.2012.05.030
- Ferrill, D. A., Morris, A. P., Stamatakos, J. A., et al., 2000. Crossing Conjugate Normal Faults. *AAPG Bulletin*, 84(10): 1543—1559. doi: 10.1306/8626BEF7—173B—11D7—8645000102C1865D
- Hardy, S., 2011. Cover Deformation above Steep, Basement Normal Faults: Insights from 2D Discrete Element Modeling. *Marine and Petroleum Geology*, 28(5): 966—972. doi:10.1016/j.marpetgeo.2010.11.005
- Hardy, S., 2013. Propagation of Blind Normal Faults to the Surface in Basaltic Sequences; Insights from 2D Discrete Element Modelling. *Marine and Petroleum Geology*, 48: 149—159. doi:10.1016/j.marpetgeo.2013.08.012
- Hu, S. Y., Yu, Y. J., Dong, D. Z., et al., 2006. Control of Fault Activity on Hydrocarbon Accumulation in Central Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 27(1): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. P., Wu, S. G., Han, W. G., et al., 2005. Research of Comprehensive Geophysical Inversion of Pre-Tertiary Tectonics in Dongying Depression. *Journal of the University of Petroleum, China*, (2): 16—20 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Q., 2010. Concept, Principle, Model and Significance of the Fault Controlling Hydrocarbon Theory. *Petroleum Exploration and Development*, 37(3): 316—324 (in

Chinese with English abstract).

- Mollema, P. N., Antonellini, M. A., 1996. Compaction Bands: A Structural Analog for Anti-Mode I Cracks in Aeolian Sandstone. *Tectonophysics*, 267 (1-4): 209-228. doi:10.1016/s0040-1951(96)00098-4
- Morley, C. K., 1999. How Successful are Analogue Models in Addressing the Influence of Pre-Existing Fabrics on Rift Structure? *Journal of Structural Geology*, 21 (8-9): 1267-1274. doi:10.1016/s0191-8141(99)00075-9
- Qi, P., Ren, J. Y., Shi, S. S., et al., 2010. Features of the Cenozoic Structure of the Coastal Zone in Qikou Sag and its Formation Mechanism. *Acta Petrolei Sinica*, 31(6): 900-905 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, L. J., 2006. Controlling of Petrophysical Fractures on Extra-Low Permeability Oil and Gas Reservoirs in Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 33 (6): 667-670 (in Chinese with English abstract).
- Sanzhong, L., Guochun, Z., Liming, D., et al., 2012. Cenozoic Faulting of the Bohai Bay Basin and Its Bearing on the Destruction of the Eastern North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 80-93. doi:10.1016/j.jseaes.2011.06.011
- Sylvester, A. G., 1988. Strike-Slip Fault. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100(31): 1666-1703. doi:10.1130/0016-7606(1988)100<1666:SSF>2.3.CO;2
- Thomas, G. E., 1974. Lineament-Block Tectonics: Williston-Blood Creek Basin. *AAPG Bulletin*, 58 (7): 1305-1322.
- Wang, W. F., Zhou, W. W., Zhou, J., et al., 2014. Formation Mechanism and Distribution of Buried Fault Zones in the Jinhua Sag. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44 (5): 1395-1405 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. F., Zhu, C. H., Zhang, X. J., et al., 2016. Genetic Types and Geological Significances of Transverse Faults at Longmenshan Fault Zone. *Earth Science*, 41 (5): 729-741 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. C., Zhao, W. Z., Li, Z. Y., et al., 2008. Role of Basement Faults in Gas Accumulation of Xujiahe Formation, Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, (5): 541-547 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. C., Zhao, W. Z., Men, X. Y., et al., 2005. Control of Basement Fault Minor-Activity on Gas Pool Formation of Upper Paleozoic. *Petroleum Exploration and Development*, 32(1): 9-13 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. M., Wang, J. Y., 2013. Low-Amplitude Structures and Oil-Gas Enrichment on the Yishaan Slope, Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 40

(1): 49-57 (in Chinese with English abstract).

- Zhao, W. Z., Hu, S. Y., Wang, Z. C., et al., 2003. Key Role of Basement Fault Control on Oil Accumulation of Yangchang Formation, Upper Triassic, Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 30(5): 2-5 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, W. W., Wang, W. F., An, B., et al., 2014a. Identification of Potential Fault Zones and its Geological Significance in Bohai Bay Basin. *Earth Science*, (11): 1627-1638 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, W. W., Wang, W. F., An, B., et al., 2014b. Genetic Types of Concealed Fault Zone and Its Significance on Hydrocarbon Accumulation. *Natural Gas Geoscience*, 25 (11): 1527-1538 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 胡素云, 蔚远江, 董大忠, 等, 2006. 准噶尔盆地腹部断裂活动对油气聚集的控制作用. *石油学报*, 27(1): 1-7.
- 李云平, 吴时国, 韩文功, 等, 2005. 东营凹陷前古近系构造综合地球物理反演. *石油大学学报: 自然科学版*, (2): 16-20.
- 罗群, 2010. 断裂控烃理论的概念、原理、模式与意义. *石油勘探与开发*, 37(3): 316-324.
- 祁鹏, 任建业, 史双双, 等, 2010. 歧口凹陷沿岸带新生代构造特征及其形成机制. *石油学报*, 31(6): 900-905.
- 邱领军, 2006. 鄂尔多斯盆地储集层物性断裂对超低渗透油气藏的控制作用. *石油勘探与开发*, 33(6): 667-670.
- 汪泽成, 赵文智, 李宗银, 等, 2008. 基底断裂在四川盆地须家河组天然气成藏中的作用. *石油勘探与开发*, 5: 541-547.
- 汪泽成, 赵文智, 门相勇, 等, 2005. 基底断裂“隐性活动”对鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏的作用. *石油勘探与开发*, 32(1): 9-13.
- 王建民, 王佳媛, 2013. 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡上的低幅度构造与油气富集. *石油勘探与开发*, 40(1): 49-57.
- 王伟锋, 周维维, 李亚辉, 等, 2014. 金湖凹陷隐性断裂带形成机制及分布. *吉林大学学报(地球科学版)*, 5: 1395-1405.
- 王伟锋, 朱传华, 张晓杰, 等, 2016. 龙门山断裂带横断层成因类型及地质意义. *地球科学*, 41(5): 729-741.
- 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等, 2003. 鄂尔多斯盆地基底断裂在上三叠统延长组石油聚集中的控制作用. *石油勘探与开发*, 30(5): 2-5.
- 周维维, 王伟锋, 安邦, 等, 2014a. 渤海湾盆地隐性断裂带识别及其地质意义. *地球科学*, (11): 1627-1638.
- 周维维, 王伟锋, 安邦, 等, 2014b. 渤海湾盆地隐性断裂带成因类型特征及其对油气聚集的控制作用. *天然气地球科学*, 25(11): 1527-1538.