

断裂转换带作为油气侧向、垂向运移通道的研究进展

孙同文^{1,2},高喜成^{1,2},吕延防²,付广²,王海学²,王浩然²

(1. 广东石油化工学院 石油工程学院,广东 茂名 525000; 2. 东北石油大学 地球科学学院,黑龙江 大庆 163318)

摘要:断陷盆地大量油气勘探证实油气并非围绕整条断裂分布,而往往集中分布于断裂转换斜坡、弯曲转折端、交汇区及末端等断裂转换带位置,表现出明显的运移通道特征。为了查明断裂转换带输导油气的优势条件及模式,在对其形成演化过程分析的基础上,进行了油气运移特征的系统分析。结果表明,断裂转换带在不同的演化阶段既可以作为油气侧向运移通道,又可以作为油气垂向运移通道。当作为侧向运移通道时,具有以下三方面的优势条件:①具备油气侧向运移的流体势梯度;②砂体发育,储层对接概率大且侧向连通性好;③具有相对低的垂向与侧向渗透率比。侧向运移主要有两种模式,即未破坏型-侧向连通油气运聚模式和破坏型-垂向、侧向封闭油气运聚模式,油气富集层位一般与运移层位一致。当作为垂向运移通道时,具有以下三方面的优势条件:①“硬连接”型转换带活动强度一般较大,容易幕式开启作为通道;②“硬连接”型转换带处断层面常为脊状低势区,有利于油气发生汇聚;③应力集中、裂缝发育,容易破坏盖层发生油气垂向渗漏。垂向运移也主要有两种模式,即未完全破坏型-油气垂向穿斜坡渗漏模式和破坏型-油气沿断层面垂向运移模式,油气一般被调整至浅层富集。通过矿物沉淀速率、成岩作用、地下水渗漏及矿床突水现象等,均可证实断裂转换带部位曾是流体运移的通道。

关键词:流体势;砂体;渗透率;应力;侧向运移;垂向运移;转换斜坡;断裂转换带;油气运移通道

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Research progress in fault transformation zones as lateral or vertical hydrocarbon migration pathways

Sun Tongwen^{1,2}, Gao Xicheng^{1,2}, Lyu Yanfang², Fu Guang², Wang Haixue², Wang Haoran²

(1. School of Petroleum Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming, Guangdong 525000, China;

2. School of Geosciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: Plenty of oil and gas exploration practices in faulted basins have shown that hydrocarbons are mainly distributed in fault transformation zones instead of the whole fault zone, including relay ramp, flexural turning point, intersection area and terminal, which show remarkable characteristics of migration pathways. In order to find out the advantageous conditions and mode of hydrocarbon migration in fault transformation zones, we made a systematic analysis of the characteristics of hydrocarbon migration based on the study of the formation and evolution of fault transformation zones. The results show that the fault transformation zones may serve as both lateral and vertical pathways for hydrocarbon migration at different evolution stages. When acting as lateral migration pathways, they are advantageous in terms of (1) the gradient of fluid potential, (2) well-developed sand bodies characterized by a higher probability of reservoir juxtaposition and better lateral connectivity, and (3) a relatively lower ratio of vertical to lateral permeability. There are two main modes of lateral migration: undamaged-laterally connected hydrocarbon migration and accumulation mode, and destroyed-vertically and laterally sealed hydrocarbon migration and accumulation mode, and hydrocarbon enrichment horizons are generally consistent with migration horizons. When acting as vertical migration pathways, they are advantageous in terms of (1) a higher activity intensity for the hard-linkage transformation zone, prone to be a migration pathway with episodic opening; (2) the fault plane of the hard-linkage transformation zone, usually a ridge-shaped low-potential area, favorable for hydrocarbon accumulation; (3) the stress concentration and fracture development, tending to destroy the caprock and resulting

收稿日期:2018-11-12;修订日期:2019-05-13。

第一作者简介:孙同文(1984—),男,博士,副教授,流体运移与保存条件。E-mail:stwp@petrolchina@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41602164);中国博士后科学基金项目(2016M591509);黑龙江省科学基金项目(QC2016048);广东石油化工学院科研基金项目(2018rc02)。

in vertical seepage. Similarly, there are also two main modes of vertical migration; incompletely destroyed-vertical hydrocarbon seepage through relay ramps, and destroyed-vertical hydrocarbon migration along fault planes, in which oil and gas tend to accumulate in shallower horizons. In addition, it can be proven that the fault transformation zone has once been the pathway of fluid migration in terms of mineral precipitation rate, diagenesis, groundwater seepage and water inrush in mine, etc.

Key words: fluid potential, sand body, permeability, stress, lateral migration, vertical migration, relay ramp, fault transformation zone, hydrocarbon migration pathway

断裂转换带是断裂为了保持应变和位移量守恒而诱导出的调节性构造变形,构造较为复杂,与单条、孤立断层相比,裂缝的数量增多、方向和范围较宽,是流体-岩石相互作用的重要场所,几乎影响所有的流体,包括油气、CO₂、地热流体、变质流体和岩浆等^[1-3]。在油气运移与聚集研究方面,近几年来越来越多的油田勘探实践表明,油气田往往集中分布于断裂弯曲转折端、断裂交汇区及断裂末端等转换带或其附近位置^[4-7],断裂转换带表现出明显的输导通道特征。但目前对断裂转换带的研究大多侧重于控制砂体入盆^[8-11]和生烃洼槽的迁移^[12-13],对其运移油气特征研究甚少,除转换斜坡可作为侧向运移通道^[3,14-15],断裂交汇区可作为垂向渗漏通道^[16-18]的少数报道外,几乎没有人专门对断裂转换带是否可以作为油气运移通道、什么情况下作为侧向或垂向运移通道,以及优势运移的条件和模式进行过系统的总结。然而,在不同的运移方式下油气富集的层位和部位都有较大差异,这无疑制约了断陷盆地的油气勘探部署,也是目前断裂输导研究中的薄弱点。本文通过总结国内外最新研究成果,在断裂转换带形成演化过程分析的基础上,对其油气运移特征进行了系统分析,分别总结了断裂转换带作为油气侧向、垂向运移通道的优势条件和运移模

式,并通过矿物沉淀速率、矿床突水现象等证实了其作为运移通道的可靠性。拟通过本次研究为目前油气勘探中断裂转换带部位的评价部署提供参考,以及丰富和完善断裂输导油气理论。

1 断裂转换带的形成演化过程

在张性盆地中,断裂转换带是表征控凹主断层沿走向通过其他形式的构造(分支断裂、凸起、转换斜坡或撕裂断层等)传递或转换为另一条控凹主断层,以保持应变和位移(伸展量)量守恒,即由于主干正断层伸展位移诱导出的调节性构造变形^[19-22]。与其相似的概念还有调节带^[23]、转换构造^[24]、传递带^[9,14,25]、变换带^[10]、构造调节带^[26]和变换构造^[27-28]等。

大量研究认为,断裂分段生长是转换带形成的主要机制^[2,29],也是裂陷盆地形成演化过程中必不可少的阶段。断层分段生长连接主要分为三个阶段^[30-32]:阶段一,孤立成核阶段(图1a,b,t₁阶段),两条断层之间彼此趋近,但相互不发生作用,之间没有或很少发育裂缝(图1c);阶段二,“软连接”阶段(图1a,t₂,t₃阶段),两条断层逐渐生长至端部接近并相互叠覆,开始发生相互作用但没有明显的连接。叠覆区断层之间相

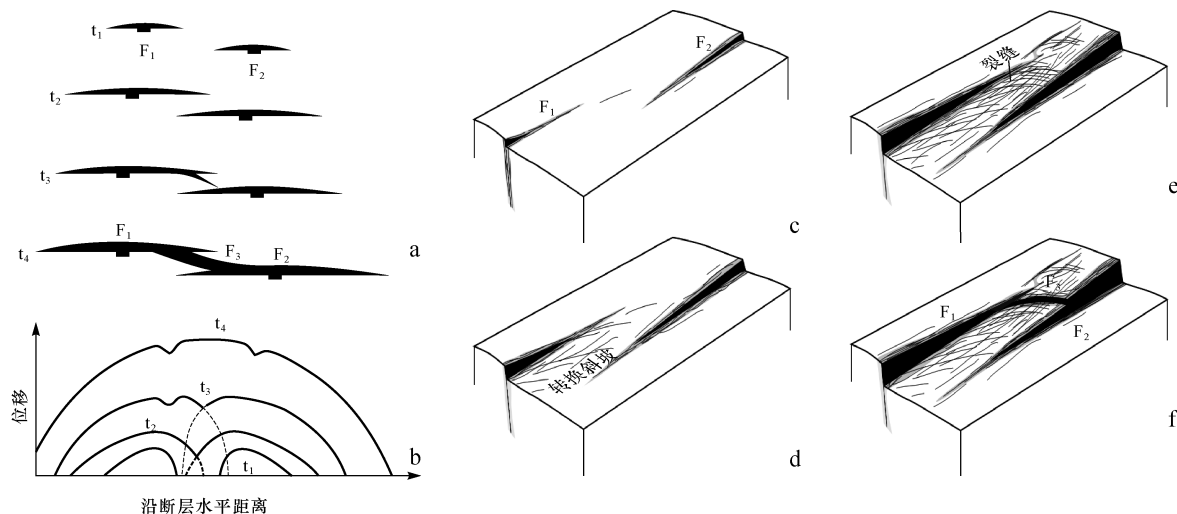


图1 断裂转换带演化过程^[31]及裂缝发育特征^[32]

Fig. 1 The evolution process of fault transformation zones^[31] and characteristics of fracture development^[32]

c. 孤立阶段;d,e. 软连接阶段;f. 硬连接阶段

互作用,开始产生裂缝,并随着演化裂缝数量增多、规模变大(图1d,e);阶段三,“硬连接”阶段^[29](图1a,t₄阶段),当相互作用进一步增强时,叠覆区裂缝数量及规模逐渐增加,两条断层之间通过转换带破坏、贯通形成一条新的连接断层(变换断层,F3),转换带完全破裂(图1f)。

根据断距—距离曲线上的特征,可以明显看出断裂生长连接部位位移为相对低值区,其低值部位即为转换带的位置(图1b)。目前常用此方法识别断裂转换带的发育部位,是断裂转换带判别的重要方法之一。

2 断裂转换带作为油气侧向运移通道的优势条件及模式

2.1 断裂转换带作为油气侧向运移通道的优势条件

一般认为,未被破坏的断裂转换带是断层上的“漏洞”,作为油气侧向穿过封闭断层的通道^[12,31]。然而,总结目前相关的研究成果表明^[3,32-33],并不是只要发育转换带就可以成为油气侧向穿过断层的通道,只有在转换带演化的早期,其完整性未被破坏,裂缝发育适中、储层侧向连通性较好时才可能成为油气侧向运移的通道。断裂转换带作为侧向运移通道时具有以下3个方面的优势条件。

2.1.1 具备油气侧向运移的流体势梯度

依据断层末端倾向的组合关系,软连接(未被破坏的)断裂转换带又可以分为3类,分别是转换斜坡、斜向背斜和地垒凸起^[4](图2)。根据目前大量的研究结果,软连接断裂转换带在勘探阶段是流体侧向运移穿过原本封闭断裂带的通道^[12,31];在开发阶段,软连接转换带代表了引起孤立断块之间压力连通的油、气、水的路径,作为流体连通的“传导器”,其出现和分布是许多断层油藏中注采方案设计和生产井位布署时要考虑的一个重要的因素^[32-33]。

软连接断裂转换带之所以能作为油气流动的关键

通道,其首要原因是因为具备了流体侧向运移的流体势梯度。其中转换斜坡和地垒凸起形成斜坡构造,而斜向背斜轴部为构造脊,均是沟通断层上、下盘的桥梁,本质上是断层上的“薄弱点”或“漏洞”^[32]。当油气沿断层从深部生烃洼槽垂向运移后,优先向这些桥梁汇聚并发生侧向运移。其中,转换斜坡一端沟通洼槽中心,另一端沟通断层上升盘,是最有利的油气侧向穿断层运移部位(图2a),当沿斜坡侧向连通性较好时即可作为优势运移通道^[34-35]。

2.1.2 储层对接概率大且侧向连通性好

在断陷盆地中,断裂转换带常常是主边界断裂带上的地形低点,具有沉降速率低、高沉积物供应特征(图3)。作为山间河流进入盆地的入口,碎屑物质沿着转换带注入盆地^[10,22]。转换带对沉积体系的控制首先表现为对物源通道的控制,在转换带处储集砂体发育,容易成为油气输导的“中转站”和油气富集的有利区带^[3,12]。希腊中部 Sperchios 盆地发现转换带控制水系入盆的平均面积为 87.5 km²,而其他部分平均面积共为 17.15 km²^[34]。说明转换带明显控制着水系入盆的位置,进而控制了砂体的分布。断陷盆地中常见硬连接横向凸起和软连接转换斜坡两种典型的转换带类型,与之对应的断层下降盘普遍发育大型扇三角洲或浊积扇砂体(图3),其控砂作用的机制在于同沉积断裂活动导致的古地貌差异,尤其是转换带断层下盘的古地貌低地对物源供给水系起着汇聚和引导作用^[36,37]。

在陆源碎屑岩储层中,完整、未被破坏的断裂转换带提供了穿断层连通性(图4a),主要体现在两个方面。一方面断裂转换带一般是碎屑物质的入盆口,控制形成扇三角洲砂体的沉积,富砂输导层发育、连通性好,常常是流体运移的优势通道和指向^[12];另一方面,褶皱但未破坏的转换带地层是连续的,除了在对每一层中形成连通的流动路径之外,由于褶皱地层和陡峭的位移梯度,未被破坏的转换斜坡还提供了在断层错断层序的多个层之间的穿断层并置,导致多储层单元发生对接,增加了流体侧向流动的机率^[38]。

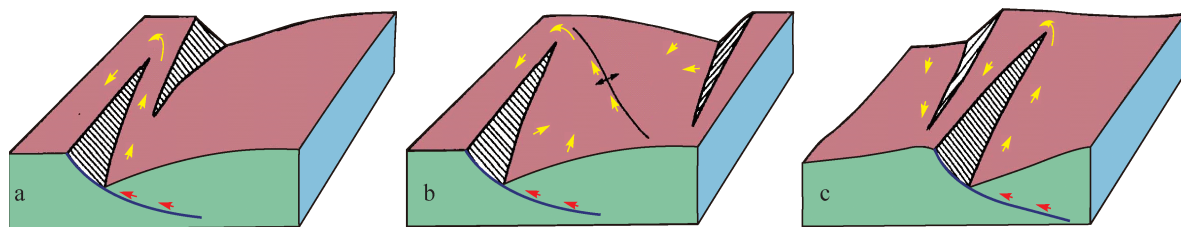


图2 软连接断裂转换带类型及油气侧向运移模式(据文献[4]修改)

Fig. 2 Types of soft-linkage fault transformation zone and modes of lateral hydrocarbon migration (modified after reference [4])

a. 同向倾斜 - 转换斜坡; b. 相向倾斜 - 斜向背斜; c. 背向倾斜 - 地垒凸起

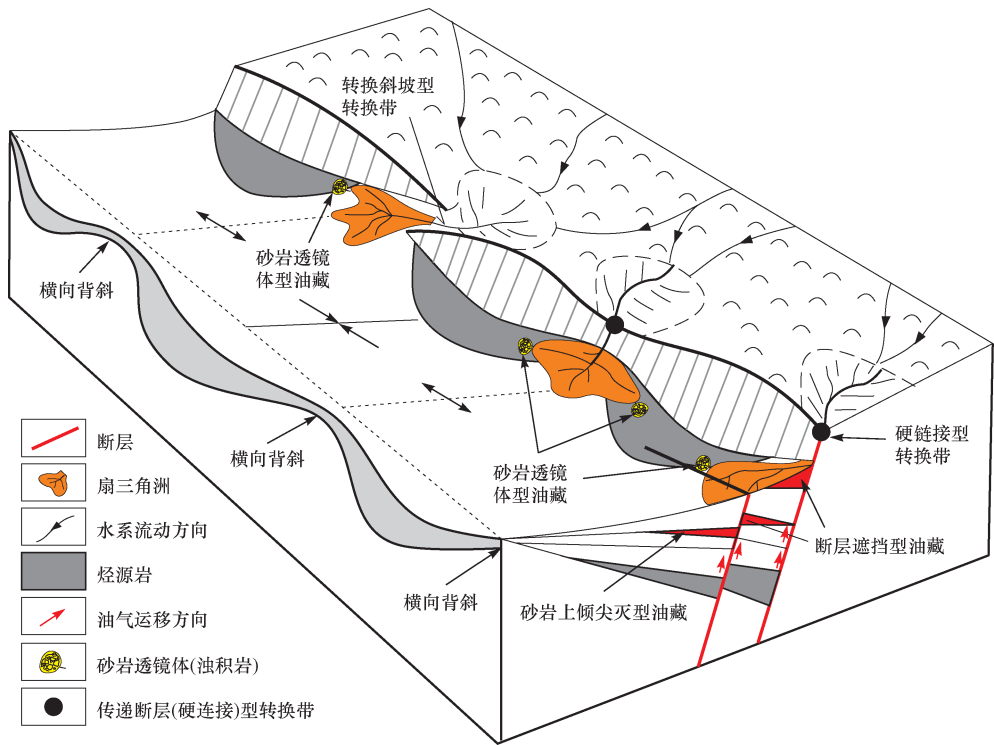


图 3 断裂转换带控砂及控藏模式^[13]

Fig. 3 A schematic diagram showing the fault transformation zone controlling sandstone development and hydrocarbon accumulation^[13]

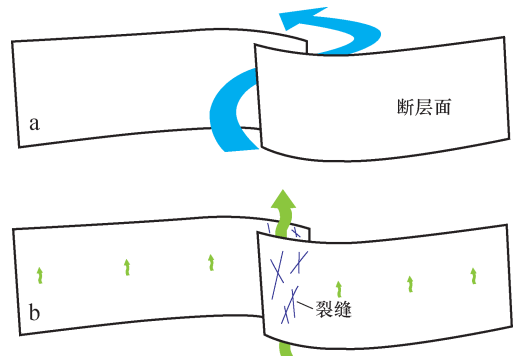


图 4 软连接断裂转换带油气侧向、垂向运移模式^[31]

Fig. 4 Modes of lateral and vertical migration of hydrocarbon in the fault transformation zone with soft linkage^[31]

- a. 转换带部位提供了穿断裂进行侧向运移的通道;
- b. 转换带内裂缝发育提供了垂向运移的通道

然而,在以下两种情况下会使碎屑岩储层转换斜坡的侧向连通性变差,使油气沿斜坡侧向运移的路径发生变化。一是多孔隙砂岩中变形带 (deformation band) 的发育^[39],往往会成为沿转换斜坡运移流体的遮挡物,非常少量低渗透变形带簇的出现都可能使沿斜坡的有效渗透率减小超过三个数量级,在研究转换斜坡作为油气侧向运移通道时需要重新谨慎考虑^[40];二是随着断裂转换带的演化,转换斜坡裂缝密度逐渐增大(图 1c),垂向渗透性增强,虽然油气仍可沿转换斜坡砂岩输导层侧向运移^[3],但部分油气垂向穿过转

换斜坡,发生油气的渗漏和调整^[31](图 4b)。

碳酸盐岩储层中断裂转换带的连通性主要受裂缝系统控制,在该部位裂缝系统最为发育、渗透率增强最大,确保了相互分离储层(油藏)单元之间的连通性,因此转换斜坡是碳酸盐岩储层中局部油气流动的重要通道^[41]。随着演化的增加,破坏后的硬连接转换带裂缝系统更加发育,可能提供了更高的垂向和侧向穿断层连通性^[31],是碳酸盐岩储层重要的油气富集区。例如,川东南和自流井凹陷钻在断裂转换带附近的 25 口井中,23 口井钻遇高密度裂缝,其中,高产、中产气井占 70%,表明断裂转换带部位裂缝改善了储集条件,并形成了一定范围的裂缝圈闭^[42]。

2.1.3 具有相对低的垂向和侧向渗透率比

垂向和侧向渗透率之比(K_v/K_h)也是转换斜坡是否能发生油气侧向流动的一个因素。Manzocchi 等^[38](2010)通过数值模拟方法系统研究了不同垂向/侧向渗透率比值情况下转换带对流体垂向运移和侧向运移的影响(图 5)。研究模型由低渗透和高渗透层交互的层序组成,在上盘层放置水平示踪注入器,下盘放置水平产出器(如同注入井和产出井),设置有转换斜坡(图 5a)和无转换斜坡(图 5b)两种模型,分别模拟在 K_v/K_h 为高值和低值时穿断层流体流动速率的变化。结果表明,当垂向/侧向渗透率之比为高值(10^{-4})时,不管断层

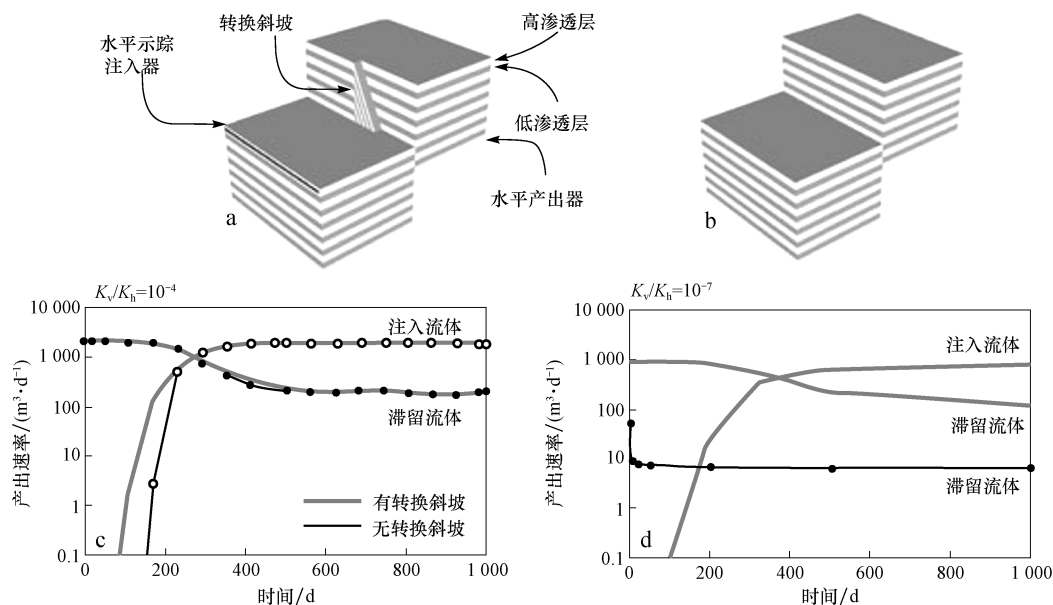


图5 不同垂/侧向渗透率比情况下转换带对穿断层流体产出速率的影响^[38]

Fig. 5 Effects of fault transformation zone on output rate of fluid through fault under different ratios of vertical to lateral permeability^[38]

a. 包含未破坏转换斜坡的模型; b. 无转换斜坡的等效模型; c, d. 不同垂/侧向渗透率比情况下两种模型的注入流体和滞留流体产量剖面

是否包含转换斜坡,产出速率都是相似的(图5c),即有无转换带的影响不大,流体主要以垂向运移为主;当垂向/侧向渗透率之比为低值(10^{-7})时,转换带作用明显,如果存在转换斜坡,则总的穿断层流体产出速率大约要高出100倍(图5d),流体主要以侧向运移为主。

2.2 断裂转换带侧向运聚油气模式

综合以上分析,未被破坏的断裂转换斜坡是油气穿过封闭断层发生侧向运移的重要通道。一方面其沟通断层上盘生烃洼槽和下盘构造高部位,并紧邻油气源断层,既具有便利的油气供给条件,又具备侧向运移的流体势梯度;另一方面转换斜坡控制扇体入盆,储集砂体发育(图6a)。根据转换斜坡的演化程度及裂缝发育密度,其侧向运聚油气特征可总结为两种模式^[14,43]:未破坏型-侧向连通油气运聚模式和破坏型-侧向封闭油气运聚模式。

未破坏型-侧向连通油气运聚模式。在软连接阶段,当裂缝发育适度并与储集砂体相匹配较好时,增加了斜坡储层侧向连通性,但又不增加其垂向连通性(参考数值模拟结果,垂向/侧向渗透率之比小于 10^{-7}),此时转换斜坡处于侧向畅通状态,沿油气源断层垂向运移的油气在进入储集层后,沿转换斜坡从上盘一侧向下盘侧向运移(图6a)。此时转换斜坡上连通性整体较好,仅发育裂缝或小型断层,在斜坡上,小型断层遮挡一侧形成断层遮挡型油气藏,油气藏规模取决于遮挡断层规模及断层的侧向封闭能力。其余油气进入下盘后在均衡沉降形成的背斜圈闭或断层遮挡部位聚

集成藏。例如,Argyll油田位于北海盆地中央地堑,油气田集中于转换斜坡处,垂直于主断层的小型断层侧向封闭,形成断层遮挡型油藏^[14]。

破坏型-侧向封闭油气运聚模式。当裂缝发育到一定程度后转换斜坡被破坏,在两条断层之间形成与其高角度相交的变换断层(图1c),并受上覆高泥质含量封盖层及断层活动速率的影响,在其垂、侧向形成封闭,油气沿转换斜坡侧向运移至封闭的变换断层后被遮挡,形成大规模断层遮挡型油气藏(图6b)。这是转换斜坡油气富集的主要运聚模式,形成大量的相关类油气田。例如,国外的南维京地堑油气田^[4]、利比亚锡尔特盆地Zelten和Lahib油田^[44]和我国渤海湾盆地黄骅坳陷^[11]、东濮凹陷西部胡状集、马寨和六塔转换斜坡油气田^[9]等。

断裂转换带作为油气侧向运移通道时,无论是未破坏型-侧向连通油气运聚模式还是破坏型-侧向封闭油气运聚模式,油气富集的层位一般与油气运移的层位一致,具有“同层”运聚的特征。

3 断裂转换带作为油气垂向运移通道的优势条件及模式

3.1 断裂转换带作为油气垂向运移通道的优势条件

3.1.1 “硬连接”型转换带活动强度一般较大,容易幕式开启作为通道

现今断层走向弯曲转折和断层交汇的部位往往是

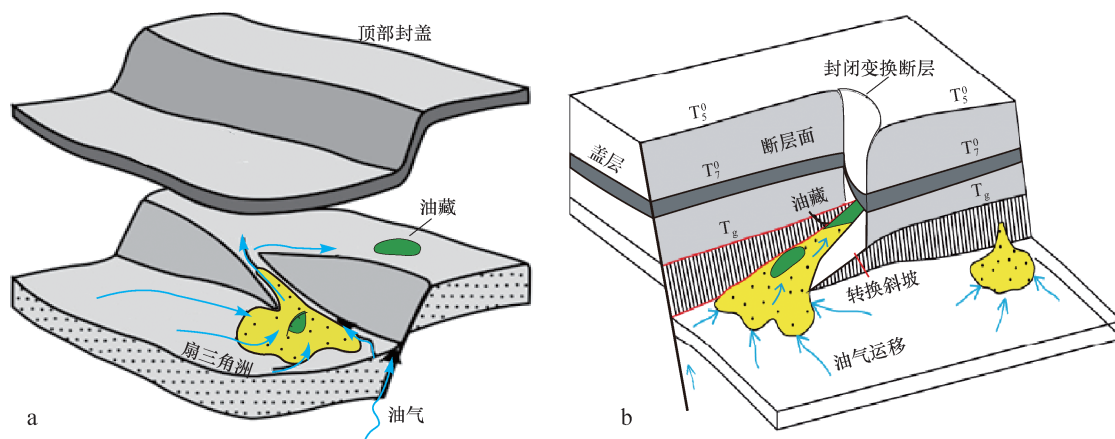


图6 油气沿断裂转换带侧向运聚成藏模式

Fig. 6 A mode showing the lateral migration and accumulation of oil and gas along a fault transformation zone

a. 未破坏型 - 侧向连通油气运聚模式^[14]; b. 破坏型 - 垂向、侧向封闭油气运聚模式^[43]

断层演化过程中发生分段生长“硬连接”的位置^[15],由于断层的弯曲或连接,导致该部位断面多半崎岖不平,容易发生应力集中,导致断裂活动频繁^[45]。天然地震是断裂活动的最直接证据,在断裂弯曲转折、强烈活动地段和两组断裂交汇部位是发生强地震较多的地方,这已成为较为公认的地震标志^[46]。据对我国190次6级以上强震统计,有67%发生于断裂交汇部位和断裂弯曲部位(图7)。在含油气盆地中,滕长宇等^[47](2014)研究表明,渤中坳陷位于活动较强的营口-潍坊与北京-蓬莱走滑断层交汇所形成的强烈转换拉张构造区,其主干断层活动最强,新近纪以来活动速率最大($FAR > 10 \text{ m/Ma}$),在新构造运动期(上新世至今)甚至超过 25 m/Ma ,大部分油气可以通过这些断层发生垂向运移并在新近系成藏。由此可见,“硬连接”型转换带处往往是断层发生幕式开启的重要部位。

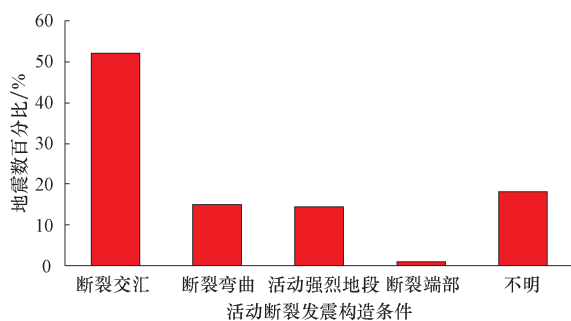


图7 中国大陆地区6级以上强震的发震构造条件(据文献[45],修改)

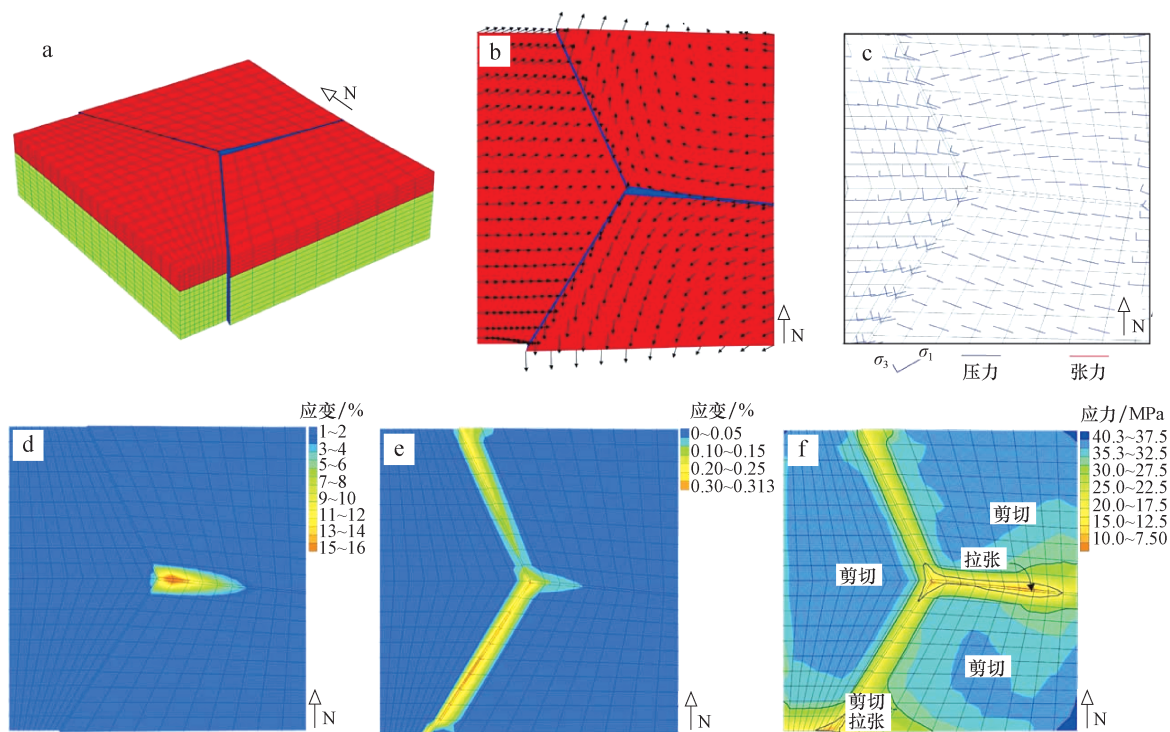
Fig. 7 Seismogenetic tectonic conditions of strong earthquakes of 6 magnitude or higher in the continental areas of China (modified after reference[45])

3.1.2 “硬连接”型转换带处断层面常为脊状低势区,有利于油气发生汇聚

在断层发生“硬连接”(走向弯曲转折和断层交汇等)部位,由于断层面的生长连接而成为脊状低势能区,有利于油气汇聚,往往是油气垂向运移的优势通道^[48-50]。例如,渤南地区 BZ28-2S/N 油田位移—距离曲线显示,断裂交叉部位为断裂转换带位置,对应于断层面为脊状构造,是整个断裂面的低势区(图8),油气优先向该部位垂向汇聚。从目前断裂分段生长点附近已钻井位,如 BZ28-2S-1 井、BZ28-2S-3 井、BZ28-2S-4 井和 BZ28-2E-1 井产液情况来看,均为富油气井位,由此证实此类转换带为油气垂向运移的优势通道^[49]。

3.1.3 应力集中、裂缝发育,容易破坏盖层发生油气垂向渗漏

Gartrell 等^[17](2004)通过直立断层和倾滑断层模型,应用有限差分数值模拟方法,对“硬连接”断层交汇区的断层位移、应力(剪切应力、差应力)及扩容变化进行了研究,结果表明断裂交汇部位是应力集中并破坏盖层发生垂向渗漏的关键部位(图8)。主要体现在以下两个方面,一是应力变化引起上部盖层在交汇区附近开启一个三角形的高扩容带,成为油气突破盖层的垂向充注通道;二是在较高的应变下,断层交汇高扩容区剪切应变值低于活动断层面,剪切型泥岩涂抹较低,封闭能力弱。同时,在两条或两条以上断裂的交汇处,岩石受力较强,容易破碎,扭张缝或张开缝发育^[42]。一般来说,断裂交汇处的破碎带规模要比两条断层之和的规模大的多^[51-52]。

图8 断裂交汇部位应力、应变分布数值模拟^[17]Fig. 8 The numerical simulation of stress and strain distribution at fault intersections^[17]

a. 数值模型; b. 位移; c. 应力分布; d. 体积应变; e. 剪切应变; f. 差应力

综合以上分析,“硬连接”断层交汇区和断层走向弯曲转折部位活动强度一般较大,容易发生幕式开启,而该部位断层面往往凹凸不平,一方面脊状构造有利于发生油气汇聚,另一方面容易导致应力集中和裂缝发育,对盖层发生破坏。具备了开启成为通道、汇聚流体集中运移和垂向通道畅通的多方面优势,是发生油气(流体)垂向运移的优势通道位置。

3.2 断裂转换带垂向运移油气模式

在转换斜坡裂缝大量发育、垂向渗透性增高或者转换斜坡被破坏,形成变换断层时,在转换带部位油气以垂向运移为主。根据其运移特征可总结为2种模式^[3,43]:未完全破坏型—油气垂向穿斜坡渗漏模式和破坏型—油气沿断层面垂向运移模式(图9)。

未完全破坏型—油气垂向穿斜坡渗漏模式。当转换斜坡未被完全破坏形成变换断层而裂缝发育程度较高时,垂向渗透性明显增高(垂向/侧向渗透率之比介于 10^{-7} 和 10^{-4})时,沿断层面从深部运移来的油气分为两部分,一部分继续垂向运移,穿过转换斜坡发生渗漏和调整(图9a),另一部分进入砂岩储集层,仍沿转换斜坡侧向运移^[3]。而当垂向渗透性进一步增高(垂向/侧向渗透率之比大于 10^{-4})时,主要以穿转换斜坡的垂向渗

漏和运移为主,基本不发生沿转换斜坡的侧向运移^[39]。

破坏型—油气沿断层面垂向运移模式。在转换斜坡逐步被破坏、形成变换断层的过程中,断层弯曲转折部位及交汇部位应力集中、活动速率较大,发生幕式启闭直至最终形成与两条叠覆断层近垂直相交的变换断层,在相交部位断层面形成脊状构造^[50],并且附近裂缝发育,是油气汇聚的有利部位,沿深层转换斜坡侧向运移的油气通过变换断层垂向调整至浅层进行成藏(图9b)。例如,在珠江口盆地惠西南地区的HZ26转换斜坡,在转换斜坡被破坏后,深层砂体中聚集的油气垂向运移至中浅层,在一定的盖层作用下沿着砂体侧向运移至圈闭中成藏^[43]。

断裂转换带作为油气垂向运移通道时,无论是未完全破坏型—油气垂向穿斜坡渗漏模式还是破坏型—油气沿断层面垂向运移模式,油气一般被调整至浅层富集,具有“跨层”运聚的特征。

需要注意的是,破坏型—油气沿断层面垂向运移模式和断裂转换带侧向运聚油气模式中的破坏型—垂向、侧向封闭油气运聚模式在成藏过程上有着较大差别,是分别发生于断裂转换带演化和断层幕式活动不同阶段的运移模式。破坏型—油气沿断层面垂向运移模式主要发生于断裂幕式活动及变换断层形成时期,

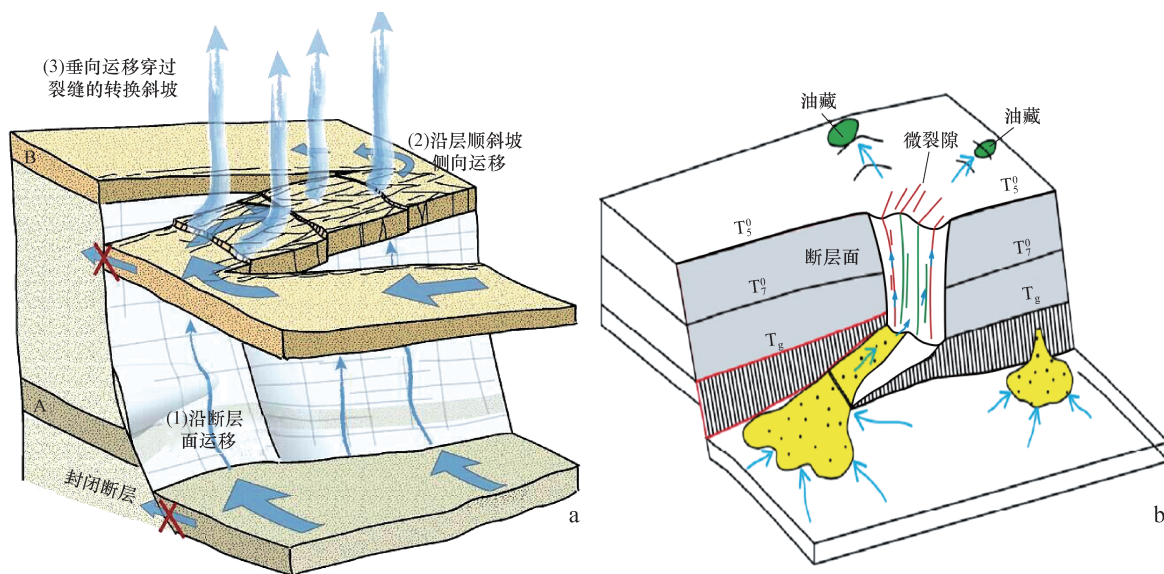


图9 断裂转换带垂向运聚油气模式

Fig. 9 The vertical migration and accumulation mode of oil and gas in the fault transformation zone

a. 未完全破坏型 - 油气垂向穿斜坡渗漏模式^[3]; b. 破坏型 - 油气沿断面垂向运移模式^[43]

油气主要沿开启的变换断层高渗透带垂向运移,油气往往被垂向调整至浅层聚集;破坏型 - 垂向、侧向封闭油气运聚模式发生于变换断层活动间歇期,垂向和侧向上封闭,当油气沿转换斜坡侧向运移至变换断层时,受其遮挡油气在下降盘一侧形成聚集,一般富集层位与侧向运移层位一致。

4 断裂转换带作为流体运移通道的证据

油气显示及油气富集是曾经发生过油气运移和聚集最直接的证据,前面已述及大量断裂转换带部位形成大量油气田,钻探成功率较高的实例,除此以外,地下水渗漏、矿物沉淀速率及成岩作用等也可以作为流体运移通道的直接证据。

4.1 地下水渗漏及矿床突水现象

在固体矿产生生产过程中发现,沿断层破碎带容易形成地下水突入矿床的通道,直接威胁矿井安全。从已发生的矿床突水情况来看,绝大多数都发生在断层密集带、交叉处、收敛处或尖灭端等断裂转换带部位^[53]。在地热方面相似的研究表明,热泉水倾向于集中在断裂转换带部位。例如,河南省栾川县九龙山汤池温泉出露于马超营断裂与葫芦沟断裂交汇部位的破碎带上,由于交汇地段岩石破碎十分强烈,成为地球深部的岩浆入侵通道,将热量向上传送,形成地热异常区^[18]。在此过程中,由于地下水的长期渗漏,断层转换带往往是形成矿物沉淀的重要区带^[1,54]。

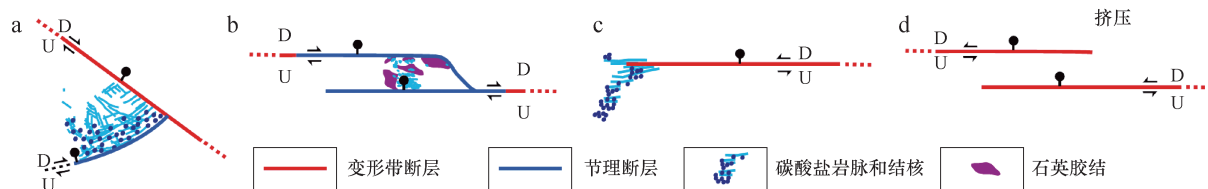
4.2 矿物沉淀速率及成岩作用

Zhang 等^[55](2010)通过二维、三维模型,对断层末端及“软连接”断层叠覆区的流体流动速率进行了数值模拟,用金(Au)和石英(quartz)进行了化学沉淀反应,结果表明最大 Au 沉淀速率出现在断层叠覆段的扩容区,而石英最大沉淀发生于流体流动速率最大的地方,证实了“软连接”断层叠覆区是流体流动速率最大位置,是断裂上最有利的渗流通道。

由于氧化及成岩作用形成如沥青、方解石脉和石英胶结等往往是成藏时期流体泄露的重要证据。美国犹他州 Moab 断层曾经是重要的流体运移通道,与其相关的碳酸盐胶结物主要有方解石、含铁白云石和孔雀石主要发育在断层交汇处、断阶(拉张、挤压)及断层末端等断裂转换带部位(图 10),证实 Moab 断层的转换带是主要发生流体运移的部位^[56]。

5 存在的问题及发展趋势

1) 目前对断裂转换带的研究更侧重于对储集砂体入盆、生烃洼槽的迁移及宏观上重要的油气富集区,而对于转换带控制的多种类型圈闭的发育和作为油气运移通道的分析较为薄弱,尤其是在油气运移方面,几乎没有研究将转换带与断裂输导机理结合起来,忽略了转换带作为断裂演化过程中形成的一种特殊变形构造,实际上是断裂构造上的“薄弱点”或“漏洞”,其自身作为油气垂向、侧向运移通道具有多方面的优势。

图10 断裂转换带相关的成岩胶结作用^[54]Fig. 10 Diagenetic cementation associated with fault transformation zones^[54]

a. 断层交汇; b. 断层台阶伸展; c. 断层末端; d. 挤压

从断裂演化机理上分析,转换带与断层相关褶皱和断层面上凹凸形貌的形成都具有内在联系。在今后的研究中,如果从断裂演化入手,系统分析不同地质历史时期的断裂活动速率、断裂连接特征、地层变形特征和断层面形貌在统一应力场下的变化规律,将能从机理上更合理地解释断裂附近油气运移和富集的全过程。

2) 目前已开展了大量的研究,以提升在地震可分辨尺度内对转换斜坡几何学和演化模式的认知,然而,还需要相当多的工作去解决此类构造内部关于变形和应力分布的问题。另外,裂缝发育程度和渗透率决定了油气运移的方向,数值模拟结果表明,当垂向/侧向渗透率之比小于 10^{-7} 时以侧向运移为主,而大于 10^{-4} 时以垂向运移为主。转换带的侧向运移和垂向运移所形成的油气富集层位差异较大,但是,国内目前关于转换带的油气勘探研究中,其作为运移通道,并控制不同油气富集层位的特征并未得到足够重视,研究较少并处于定性分析阶段,远未达到定量评价的程度。

3) 在现阶段研究中,一般认为“软连接”叠覆型转换(走向)斜坡是油气侧向运移穿越断层的通道,通过孔隙度和渗透率参数评价运移通道的连通性。但是,在多孔砂岩中,虽然孔渗性整体较高,但变形带(deformation band)的发育往往会成为沿转换斜坡运移流体的遮挡物,非常少量低渗透变形带簇的出现都可能使沿斜坡的有效渗透率减小超过三个数量级,在研究转换斜坡作为流体输导通道时需要重新谨慎考虑。

6 结论

1) 并不是只要发育转换斜就可以成为油气侧向穿过断层的通道,只有在转换带演化的早期,其完整性未被破坏、裂缝发育适中、储层侧向连通性较好时才可能成为油气侧向运移的通道,转换带作为侧向运移通道具有以下三方面的优势条件:一是具备油气侧向运移的流体势梯度;二是砂体发育,储层对接概率大且侧向连通性好;三是具有相对低的垂向、侧向渗透率比。

2) 断裂转换带中,裂缝高度发育、未被完全破坏

转换斜坡和已发生硬连接的断层走向弯曲、断层交汇等部位往往是油气垂向运移的优势通道部位,具备以下三方面优势条件:一是“硬连接”型转换带活动强度一般较大,容易幕式开启作为通道;二是“硬连接”型转换带处断层面常为脊状低势区,有利于油气发生汇聚;三是应力集中、裂缝发育,容易破坏盖层发生油气垂向渗漏。

3) 根据转换斜坡的演化程度及裂缝发育密度,其侧向运聚油气特征可总结为两种模式:未破坏型—侧向连通油气运聚模式和破坏型—垂向、侧向封闭油气运聚模式,油气富集层位一般与运移层位一致;在转换斜坡裂缝大量发育或者被破坏时以垂向运移为主,根据其运移特征可总结为两种模式:未完全破坏型—油气垂向穿斜坡渗漏模式和破坏型—油气沿断层面垂向运移模式,油气一般被调整至浅层富集。通过矿物沉淀速率、成岩作用、地下水渗漏和矿床突水现象等均可证实断裂转换带部位是流体运移的通道。

参 考 文 献

- [1] Sibson R H. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes[J]. Journal of Structural Geology, 1996, 18(8): 1031–1042.
- [2] Peacock D C P, Sanderson D J. Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones[J]. Journal of Structural Geology, 1991, 13: 721–733.
- [3] Fossen H, Rotevatn A. Fault linkage and relay structures in extensional settings—A review [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 154: 14–28.
- [4] Morley C K, N Elson R A, Patton T L, et al. East African rift system and the irrelevance to hydrocarbon exploration in rifts [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74 (8): 1234–1253.
- [5] 刘德来, 王伟, 马莉. 伸展盆地转换带分析—以松辽盆地北部为例[J]. 地质科技情报, 1994, 13(2): 5–9.
Liu Delai, Wang Wei, Ma Li. Analysis of extensional basin transition zone: a case study of northern Songliao Basin [J]. Geological Science And Technology Information, 1994, 13(2): 5–9.
- [6] 汪望泉, 窦立荣, 张志伟, 等. 苏丹福拉凹陷转换带特征及其与油气的关系[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 124–127.
Wang Wangquan, Dou Lirong, Zhang Zhiwei, et al. Transfer zone character and its relationship to hydrocarbon in Fula Sag, Sudan [J]. Petroleum Exploration And Development, 2007, 34(1): 124–127.

- [7] 史文东,彭尚谦,姜凤玖. 东辛油田断层转换带与油气富集[J]. 石油勘探与开发,2010,30(5):14-17.
Shi Wendong, Peng Shangqian, Jiang Fengjiu. Relationship between petroleum accumulation and transfer zone in Dongxin Oilfield[J]. Petroleum Exploration And Development,2010,30(5):14-17.
- [8] Muraoka H, Kamata H. Displacement distribution along minor fault traces[J]. Journal of Structural Geology,1983,5(5):483-495.
- [9] 陈发景,贾庆素,张洪年. 传递带及其在砂体发育中的作用[J]. 石油与天然气地质,2004,25(2):144-148.
Chen Fajing, Jia Qingsu, Zhang Hongnian. Transfer zone and its relation with distribution of sand bodies[J]. Oil & Gas Geology,2004,25(2):144-148.
- [10] 漆家福. 裂陷盆地中的转换带及其石油地质意义[J]. 海相油气地质,2007,12(4):43-50.
Qi Jiafu. Structural transfer zones and significance for hydrocarbon accumulation in rifting basins[J]. Marine Origin Petroleum Geology. 2007,12(4):43-50.
- [11] 王家豪,王华,肖敦清,等. 伸展构造体系中传递带的控砂作用-储层预测的新思路[J]. 石油与天然气地质,2008,29(1):19-25.
Wang Jiahao, Wang Hua, Xiao Dunqing, et al. Control of transfer zone on sandbodies in the extensional structure system-a new approach to reservoir prediction[J]. Oil & Gas Geology,2008,29(1):19-25.
- [12] Schlische R W. Geometry and origin of fault-related folds in extensional settings[J]. AAPG Bulletin,1995,79(11):1661-1678
- [13] 付晓飞,孙兵,王海学,等. 断层分段生长定量表征及在油气成藏研究中的应用[J]. 中国矿业大学学报,2015,44(2):271-281.
Fu Xiaofei, Sun Bing, Wang Haixue, et al. Fault segmentation growth quantitative characterization and its application on sag hydrocarbon accumulation research[J]. Journal of China University of Mining & technology,2015,44(2):271-281.
- [14] 陈昭年,陈发景,王琦. 正断层软联接及其传递带类型[J]. 现代地质,2005,19(4):495-499.
Chen Zhaonian, Chen Fajing, Wang Qi. Types of normal faults "soft linkage" and corresponding transfer zones[J]. Geoscience,2005,19(4):495-499.
- [15] 王海学,吕延防,付晓飞,等. 裂陷盆地转换带形成演化及其控藏机理[J]. 地质科技情报,2013,32(4):102-110.
Wang Haixue, Lv Yan, Fu Xiaofei, et al. Formation evolution and reservoir-controlling mechanism of relay zone in rift basin[J]. Geological Science and Technology Information,2013,32(4):102-110.
- [16] Gartrell A, Zhang Y, Lisk M, et al. Enhanced hydrocarbon leakage at fault intersections; an example from the Timor Sea, Northwest Shelf, Australia[J]. Journal of Geochemical Exploration,2003,78-79(03):361-365.
- [17] Gartrell A, Zhang Y, Lisk M, et al. Fault intersections as critical hydrocarbon leakage zones; integrated field study and numerical modelling of an example from the Timor Sea, Australia[J]. Marine & Petroleum Geology,2004,21(9):1165-1179.
- [18] 胡静,涂良权,刘会平. 河南省九龙山汤池温泉地热地质特征及成因机制[J]. 地质科技情报,2012,31(4):86-90.
Hu Jing, Tu Liangquan, Liu Huiping. Geological features and formation mechanism of Tangchi hot spring in Jiulongshan Mountain area[J]. Geological Science and Technology Information,2012,31(4):86-90.
- [19] Scott D L, Rosendahl B R. North Viking graben: An East African perspective[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin,1989,73:155-165.
- [20] 周心怀,余一欣,魏刚,等. 渤海海域辽东湾海域 JZ25-1S 转换带与油气成藏的关系[J]. 石油学报,2008,29(6):837-840.
Zhou Xinhui, Yu Yixin, Wei Gang, et al. Relationship between JZ25-1S transfer zone and hydrocarbon accumulation in Liaodongwan offshore of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2008,29(6):837-840.
- [21] 余一欣,周心怀,汤良杰,等. 渤海海域辽东湾坳陷正断层联接及其转换带特征[J]. 地质论评,2009,55(1):79-84.
Yu Yixin, Zhou Xinhui, Tang Liangjie, et al. Linkages of normal faults and transfer zones in the Liaodongwan Depression, Offshore Bohai Bay Basin[J]. Geological Review,2009,55(1):79-84.
- [22] 刘恩涛,王华,林正良,等. 北部湾盆地福山凹陷构造转换带及其油气富集规律[J]. 中南大学学报(自然科学版)2012,43(10),3946-3953.
Liu Entao, Wang Hua, Lin Zhengliang, et al. Characteristics and hydrocarbon enrichment rules of transfer zone in Fushan Sag, Beibuwan Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2012,43(10),3946-3953.
- [23] Fauld J E, Varga R J. The role of accommodation zones and transfer zones in the regional segmentation of extended terranes//Faulds J E, Stewart J H. Accommodation Zones and Transfer Zones: The Regional Segmentation of the Basin and Range Province[C]. Geological Society of America Special Paper,1998,(323):1-46.
- [24] Larsen P H. Relay structures in a Lower Permian basement-involved extensional system, East Greenland[J]. Journal of Structural Geology,1988,10:3-8.
- [25] Dahlstrom C D A. Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains [M]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology,1970,18:332-406.
- [26] 郭光辉,漆家福. 黄骅盆地一级转换带的特征与成因[J]. 石油与天然气地质,1999,20(2):125-128.
Wu Guanhui, Qi Jiafu. Characteristics and origin of first order Transfer zones in huanghua basin[J]. Oil & Gas Geology,1999,20(2):125-128.
- [27] 胡望水,王燮培. 松辽盆地北部变换构造及其石油地质意义[J]. 石油与天然气地质,1994,15(2):164-172.
Hu Wangshui, Wang Xiepei. Transform structures in northern part of songliao Basin and its significance in petroleum geology[J]. Oil & Gas Geology,1994,15(2):164-172.
- [28] 陈书平,漆家福,王德仁,等. 东濮凹陷断裂系统及变换构造[J]. 石油学报,2007,28(1):43-49.
Chen Shuping, Qi Jiafu, Wang Deren, et al. Fault systems and transfer structures in Dong pu Sag[J]. Acta Petrolei Sinica,2007,28(1):43-49.
- [29] Kim Y S, Sanderson D J. The relation between displacement and length of faults[J]. Earth-Science Review,2005,68:317-334.
- [30] Segall P, Pollard D D. Mechanics of Discontinuous faults[J]. Journal of geophysical research,1980,85:4337-4350.
- [31] Rotevatn A, Bastesen E. Fault linkage and damage zone architecture in tight carbonate rocks in the Suez Rift (Egypt): implications for permeability structure along segmented normal faults[J]. Geological Society London Special Publications,2014,374:79-95.
- [32] Fossen H, Johansen T E S, Hesthammer J, et al. Fault interaction in

- porous sandstone and implications for reservoir management; examples from southern Utah [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89 (12): 1593 – 1606.
- [33] Fossen H. Structural Geology [M]. Cambridge University Press, 2010, 1 – 463.
- [34] Hesthammer J, Fossen H. Seismic attribute mapping for structural interpretation of the Gullfaks Field, northern North Sea [J]. Petroleum Geoscience, 1997, 3 (1): 13 – 26.
- [35] Manzocchi T, Heath A E, Palanithakumar B, et al. Faults in conventional flow simulation models: A consideration of representational assumptions and geological uncertainties [J]. Petroleum Geoscience, 2008, 14 (1): 91 – 110.
- [36] Thorsen C E. Age of growth faulting in southeast Louisiana Trans Gulf Coast ASS [J]. Geol. Soc., 1963, 13: 103 – 110.
- [37] 王家豪, 王华, 任建业, 等. 黄骅坳陷中区大型斜向转换带及其油气勘探意义 [J]. 石油学报, 2010, 31 (3): 355 – 360.
- Wang Jiahao, Wang Hua, Ren Jianye, et al. A great oblique transition zone in the central Huanghua Depression and its significance for petroleum exploration [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31 (3): 355 – 360.
- [38] Manzocchi T, Childs C, Walsh J J. Faults and fault properties in hydrocarbon flow models [J]. Geofluids, 2010, 10 (1 – 2): 94 – 113.
- [39] Rotevatn A, Fossen H, Hesthammer J, et al. Are relay ramps conduits for fluid flow? Structural analysis of a relay ramp in Arches National Park, Utah [J]. Geological Society London Special Publications, 2007, 270 (1): 55 – 71.
- [40] Agosta F, Aydin A. Architecture and deformation mechanism of a basin-bounding normal fault in Mesozoic platform carbonates, central Italy [J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28 (8): 1445 – 1467.
- [41] Rotevatn A, Buckley S J, Howell J A, et al. Overlapping faults and their effect on fluid flow in different reservoir types [J]. AAPG Bulletin, 2009, 28 (8): 407 – 427.
- [42] 吴康. 川东南地区阳新统气藏断层效应初探 [J]. 天然气工业, 1989, 9 (4): 15 – 18.
- Wu Kang. Preliminary study on fault effect of Yangxin gas reservoir in Southeast Sichuan [J]. Natural Gas Industry, 1989, 9 (4): 15 – 18.
- [43] 李洪博, 王瑞, 彭辉界, 等. 珠江口盆地惠西南地区转换斜坡类型及其控藏作用 [J]. 地质科技情报, 2018, 37 (1): 46 – 52.
- Li Hongbo, Wang Rui, Peng Huijie, et al. Type of the transfer ramp and its controlling hydrocarbon in the southwest of Huizhou depression [J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37 (1): 46 – 52.
- [44] Harding T P. Graben hydrocarbon occurrences and structural style [J]. AAPG Bulletin, 1984, 68: 333 – 362.
- [45] 中国地震局监测预报司. 地震地质学 [M]. 北京: 地震出版社, 2007: 110 – 124.
- Monitoring and Forecasting Department of China Earthquake Administration. Seismology [M]. Beijing: Earthquake Press, 2007: 110 – 124.
- [46] 张四昌. 中国大陆共轭地震构造研究 [J]. 中国地震, 1991, 7 (2): 69 – 76.
- Zhang Sichang. Studies of conjugate seismotectonics of the continental earthquakes in China [J]. Earthquake Research in China, 1991, 7 (2): 69 – 76.
- [47] 滕长宇, 邹华耀, 郝芳. 渤海湾盆地构造差异演化与油气差异富集 [J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44 (4): 579 – 590.
- Teng Changyu, Zou Huayao, Hao Fang. Control of differential tectonic evolution on petroleum occurrence in Bohai Bay Basin [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44 (4): 579 – 590.
- [48] 罗群, 庞雄奇, 姜振学. 一种有效追踪油气运移轨迹的新方法——断面优势运移通道的提出及其应用 [J]. 地质论评, 2005, 51 (2): 156 – 162.
- Luo Qun, Pang Xiongqi, Jiang Zhenxue. A new method for effective trace petroleum migration path concept of fault section dominant migrating channel and Its application [J]. Geological Review, 2005, 51 (2): 156 – 162.
- [49] 孙永河, 杨文璐, 赵荣, 等. 渤南地区 BZ28 – 2S/N 油田油水分布主控因素 [J]. 石油学报, 2012, 33 (5): 790 – 797.
- Sun Yonghe, Yang Wenlu, Zhao Rong, et al. Main controlling factors of the oil-water distribution in BZ28 – 2S/N oilfield, Bonan area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33 (5): 790 – 797.
- [50] 蒋有录, 刘景东, 李晓燕, 等. 根据构造脊和地球化学指标研究油气运移路径: 以东濮凹陷濮卫地区为例 [J]. 地球科学 – 中国地质大学学报, 2011, 36 (3): 521 – 529.
- Jiang Youlu, Liu Jingdong, Li Xiaoyan, et al. Actual hydrocarbon migration paths based on ridge-like structures analysis and geochemical indicators tracking: A case study of Puwei area of Dongpu Depression [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2011, 36 (3): 521 – 529.
- [51] Billi A, Salvini F. and Storti F. The damage zone-fault core transition in carbonate rocks: implications for fault growth, structure and permeability [J]. Journal of Structural Geology. 2003. 25 (11): 1779 – 1794.
- [52] Kim Y S, Sanderson D J. Inferred fluid flow through fault damage zones based on the observation of stalactites in carbonate caves [J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32 (9): 1305 – 1316.
- [53] 曾文青. 白浪铝土矿区 F2 断层破碎带导水性研究 [J]. 资源环境与工程, 2010, 24 (3): 289 – 292.
- Zeng Wenqing. Conductivity property of F2 fault fracture zone in Bailang Bauxite district [J]. Resources Environment & Engineering, 2010, 24 (3): 289 – 292.
- [54] Tripp G I, Vearncombe J R. Fault/fracture density and mineralization: a contouring method for targeting gold exploration [J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26 (6 – 7): 1087 – 1108.
- [55] Zhang Y, Schaub P M, Zhao C, et al. Fault-related dilation, permeability enhancement, fluid flow and mineral precipitation patterns: numerical models [J]. Geological Society London Special Publications, 2008, 299 (1): 239 – 255.
- [56] Eichhubl P, Davatzes N C, Becker S P. Structural and diagenetic control of fluid migration and cementation along the Moab Fault, Utah [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93 (5): 653 – 681.