

doi:10.3799/dqkx.2011.008

准噶尔盆地腹部断裂控油的物理模拟实验及其成藏意义

丁文龙¹, 金之钧², 张义杰³, 曾溅辉⁴, 王洪玉⁴

1. 中国地质大学能源学院, 北京 100083
2. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083
3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
4. 中国石油大学资源与信息学院, 北京 102249

摘要: 根据准噶尔盆地腹部地区二维和三维地震断裂构造样式解释、深浅层断裂生长指数和活动速率计算及声发射各主要构造运动期最大主应力值测试, 结合盆地构造演化与油气成藏等研究成果, 研究了盆地腹部地区断裂系统的形成演化、基本特征及其控油模式, 并转化为实验模型, 模拟了单一相(油相)连续、稳态流体运动条件下, 深、浅两套断裂输导体系中石油的运移和聚集过程。结果表明盆地腹部地区受周缘板块的相互碰撞产生的挤压和走滑构造作用及多期次构造运动的影响, 断裂发育, 纵向上明显存在深、浅层两套不同性质的断裂系统, 深层为基底卷入式压扭性逆冲断裂系统, 浅层为盖层滑脱型张扭性正断层系统, 其分别形成于海西运动中晚期和燕山运动早中期等强烈构造活动时期; 高渗透性断裂带的确是油气快速运移的优势通道, 盆地腹部地区深、浅层断层均是石油向上运移的主要输导体, 断裂带渗透率大小决定着石油运移的方向和路径。在断层带顶部存在盖层封闭的条件下, 石油在断层带中的运移呈不均匀地向上运动, 断层带中含油饱和度自上而下增加, 在向下增加的过程, 石油倾向于在区域性盖层之下储层物性好的砂层中运移, 而且是优先进入断裂上盘渗透率较大的砂层中, 随着断裂带含油饱和度的不断地增加和断裂上盘储层物性好的砂层中进油量不断增多, 进行侧向运移, 最终聚集成藏, 尔后再进入断裂下盘相应的砂层中, 进油量较少; 而物性较差的砂层中很少有石油进入。该实验结果得到了盆地腹部地区断裂两侧储层流体地球化学分析测试数据的佐证, 对深化断裂输导体系下石油运移聚集成藏的理论认识与指导该地区的油气勘探实践均具有重要意义。

关键词: 准噶尔盆地; 断裂系统; 断裂控油模式; 物理模拟实验; 石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2011)01-0073-10

收稿日期: 2010-07-21

Experimental Simulation of Faults Controlling Oil Migration and Accumulation in the Central Part of Junggar Basin and Its Significance for Petroleum Geology

DING Wen-long¹, JIN Zhi-jun², ZHANG Yi-jie³, ZENG Jian-hui⁴, WANG Hong-yu⁴

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. Exploration and Development Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China
3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China
4. Faculty of Natural Resources and Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract: Based on the studies on the faults system in the central part of Junggar basin such as the 2D and 3D seismic faults structural style interpretation, deep and shallow layer fault growth index, fault activity rate calculation, and maximum principle stress test in various tectonic events analyzed from acoustic emission data, as well as study on the regional structural evolution and hydrocarbon migration and accumulation, the faults system formation, evolution, basic characteristics and hydrocarbon-controlling model are studied through experiments, which simulate continuous, stable and single phase hydrocarbon (oil phase) migration and accumulation process, respectively in deep and shallow faults system. Results show that central part of Junggar basin experienced compression and strike-slip resulted from collision by Peripheral plates, leading to well-developed faults. There occur two types of faults system in vertical with different property in the deep and shallow layers. The deep one is base-

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41072098); 国家科技重大专项(No. 2008ZX05031-001-005HZ); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No. 2006CB202302); 中国石油科技创新基金项目(No. 2008D-5006-01-06)。

作者简介: 丁文龙(1965-), 男, 副教授, 博士后, 从事石油构造分析与控油作用方面的教学与科研工作。E-mail: dingwenlong2006@126.com

ment-involved thrust-type pressure-shear fault system; the shallow one is seal detachment transtension normal fault system, respectively formed in the middle-late Hercynian and early-middle Yanshan. High permeable fault belt is truly hydrocarbon predominant migration pathway. Deep and shallow fault system in the central part of Junggar basin is main pathways for hydrocarbon migration. The permeability of fault belts determines the direction and pathway of hydrocarbon migration. With the seal from the top of fault system, hydrocarbon moves up heterogeneously within the fault, with oil saturation increasing downward. Hydrocarbon tends to migrate within the reservoir with good prosperity under regional seal, and enters prior reservoir with high permeability in the upper wall of fault. With the hydrocarbon saturation within fault and hydrocarbon volume increasing in the upper hand of fault, hydrocarbon flows horizontally and accumulates somewhere, and then goes into lower wall of fault with small amount of oil accumulation, thus almost no oil enters the poor prosperity reservoir. This experiment result proves to be correct by the fluid geochemical analytical data of both sides of the fault, which is significant for understanding the oil migration and accumulation in the fault system in the central part of Junggar basin, and is useful for guiding oil exploration and development.

Key words: Junggar basin; fault system; fault controlling oil mode; physical simulation experiment; petroleum geology.

断裂控油的实质是对油气运移和聚集的控制作用(谯汉生等, 1999; 丁文龙等, 2002; 赵文智等, 2003; 郝芳等, 2004; 吴孔友等, 2005; 于翠玲和曾溅辉, 2005; 胡素云等, 2006). 断裂对油气运移既起到输导(开启)作用, 也起遮挡(封闭)作用. 输导与遮挡同样重要, 输导是成藏的前提, 遮挡是成藏的保障, 输导与遮挡主要取决于断裂带本身的构造属性和断裂两盘的岩性对接关系(华保钦, 1995; 鲁兵等, 1998; 柳广弟等, 2002; 杜春国等, 2007; 高君等, 2009). 断裂输导体系的时空展布控制着含油气流体运移的方向、路径和分布(王雅春和王胜男, 2009; 张仲培等, 2009). 目前, 有关断裂开启与封闭性的研究, 国内外均比较重视, 在理论研究和研究方法上均取得了许多新的成果. 在封闭机理研究方面, 目前认为主要有对接并置、泥岩涂抹、碎裂作用和成岩胶结作用 4 种(Smith, 1966; Engelder, 1974; Weber *et al.*, 1978; Smith, 1980; Watts, 1987; 陈发景和田世澄, 1989; Watts *et al.*, 1991; Knipe, 1992; Antonetlini and Aydin, 1994, 1995; Gibson, 1994; Berg and Avery, 1995; 鲁兵等, 1998), 近年来, 流体作用这一概念的引入, 使断层封闭性机理研究更加深入一步(陈红汉和李思田, 1996). 断层的封闭模式研究划分了 4 类: 并置封闭模式、构造岩封闭模式、力学封闭模式和时间配置模式(Harding and Tuminas, 1988, 1989). 断层封闭性研究方法可归结为以下 3 大类: 地质学方法, 包括定性分析和半定量分析; 数学地质方法有逻辑信息法、非线性映射分析法、断层压力算法、模糊评判分析法及概率法等; 计算机处理技术有构造应力场模拟、地震资料特殊处理技术、断层封堵性专业模拟软件(FAPS)等. Allan(1989)提出了“断面剖面分析法”, 用来说明与断层有关的圈闭和运移, Allan 剖面 and 断层面构造图是用于断

层封堵性研究的最基本图件. Knipe(1997)提出了断层封闭性的“图示分析法”; Yielding *et al.* (1997)提出了“断层封闭性定量分析法”, 泥岩涂抹潜力(CSP)、涂抹因子系数(SSF)及断层泥比率(SGR)的临界值分别为 10%、7% 和 20%, 即当 $CSP > 10\%$ 、 $SSF < 7\%$ 、 $SGR > 20\%$ 时, 断层具有封堵性, SGR、CSP 值越大, SSF 值越小, 断层的封堵性越好(Bouvier *et al.*, 1989; Yielding *et al.*, 1997). 传统的地质观测和数值模拟方法由于受断层带强烈的非均质性和各向异性的影响, 在实际应用到对断层封闭性评价时还存在诸多不确定性. 故随着物理模拟实验理论和方法技术的不断完善, 已能够在实验室条件下模拟含油气盆地中各种断裂输导体系下的油气运移和聚集过程(曾溅辉和王洪玉, 1999; 曾溅辉和金之钧, 2000; 侯平等, 2005; 姜振学等, 2005; 尚尔杰等, 2005; 杨荣军等, 2006; 孙永河等, 2007). 因此, 在对准噶尔盆地腹部浅层和深层具有转换性质的两套不同断裂体系控油模式研究的基础上, 建立实验模型, 利用石油大学教育部油气成藏物理模拟实验室, 模拟了单一相(油相)连续、稳态流体运动条件下, 深、浅两套断裂输导体系对油气的输导和遮挡作用, 揭示了准噶尔盆地腹部地区断裂的控油特征. 对于深化断裂输导体系下石油运移聚集成藏的理论认识和指导该地区的油气勘探实践均具有重要意义.

1 断裂系统及控油模式

1.1 断裂形成演化与基本特征

准噶尔盆地处于哈萨克斯坦板块、西伯利亚板块和塔里木板块的交汇部位, 是一个三面被古生代缝合线围绕的晚石炭世到第四纪发展起来的大陆板内沉积盆地. 寒武纪—早石炭世到晚石炭世的早期

表现为被动大陆边缘,晚石炭世末期,盆地周缘的哈萨克斯坦板块、西伯利亚板块及塔里木板块相继发生碰撞缝合和褶皱造山,结束了被动大陆边缘的发育历史,盆地进入了区域性挤压构造背景(马宗晋等,2008)。由于向南漂移的西伯利亚板块的作用力大于向北漂移的塔里木板块的作用力,而且这两个作用力不在同一条直线上,因此产生了右旋力偶,伴随着海西期、印支期、燕山期、喜马拉雅期等多期复杂构造运动的影响,使盆地内发育大量压扭性断裂(图 1),地震剖面上的花状构造样式和平面上断裂构造的雁行排列,反映出盆地腹部地区断裂的形成不仅受到水平挤压作用力的控制,同时还受到右行走滑作用力的影响;多期次构造运动使盆地内的断裂系统演化具有阶段性,石炭纪末到二叠纪末海西运动中、晚期,断裂一直处于活动期;三叠纪印支运动期,地体拼贴作用力完全消失,而板块碰撞作用力对盆地腹部地区影响较弱,断裂活动处于休止期;侏罗纪—白垩纪早期的燕山运动早、中期,盆地处于外压内张构造环境之中,受基底上隆和基底卷入式压扭性断裂的走滑拉分等联合作用,在侏罗系内部形成了一系列的正断层;喜马拉雅运动对盆地腹部地区基本没有影响,因而断裂均未向上切穿白垩系;在纵向上,盆地腹部地区断裂系统存在着明显的分层性,以中下三叠统泥岩为界限,可以划分为深层压扭

性逆冲断裂系统和浅层张扭性伸展断裂系统(李振宏等,2002)(图 2)。

深层压扭性逆冲断裂系统形成于海西运动中、晚期,断开层位主要为石炭系—三叠系,少数向上一直断开侏罗系和白垩系地层,断距大,在 100~260 m 之间,断面陡直,倾角在 60° 以上,断层延伸距离长,活动强度大,如盆地腹部地区深层莫北断裂,二叠纪海西期断裂生长指数和活动速率均较大,分别为 2.53 和 14.4,岩石声发射古地应力测试结果表明,二叠纪末最大主应力有效值为 86.7 Ma。

浅层张扭性伸展断裂系统主要形成于燕山运动早、中期,断开层位为上三叠统以上地层的一系列正断层,断距小,为 20~100 m。延伸长度较短,断面陡直,倾角在 70° 以上,浅层断层数量较深层的少,反映出盆地腹部地区从早到晚断裂活动强度有逐渐减弱的趋势。浅层断裂系统中的断裂,如莫 005 井东断裂,在纵向自下而上从侏罗系三工河组—西山窑组—头屯河组的生长指数和活动速率由小到大,三工河组生长指数最小,在 1.1 左右,西山窑组和头屯河组生长指数较大,在 1.50~2.17 之间,表明断裂主要活动时期为中侏罗世西山窑组和头屯河组沉积时期,即燕山运动早、中期;岩石声发射古地应力测试结果表明,侏罗纪中、晚期最大主应力有效值为 76.1 Ma,反映该时期断裂活动强度也比较大。

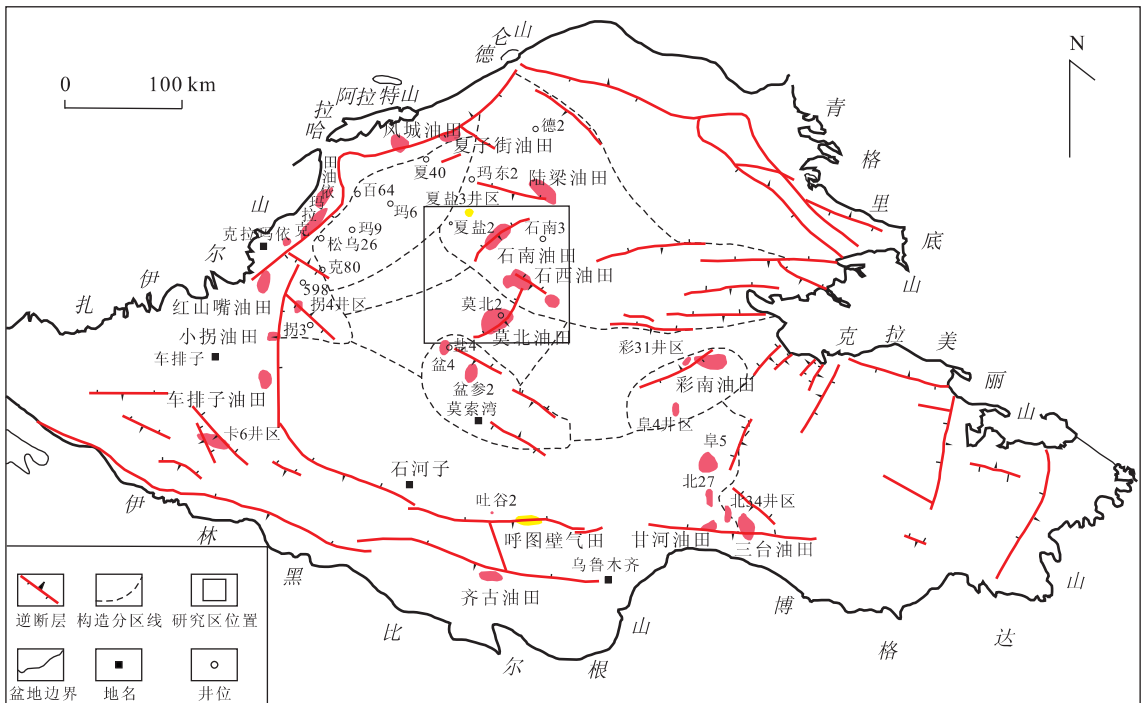


图 1 准噶尔盆地断裂与油气藏分布(据王宜林等,2002,有修改)

Fig. 1 The location map of faults and reservoirs in the Junggar basin

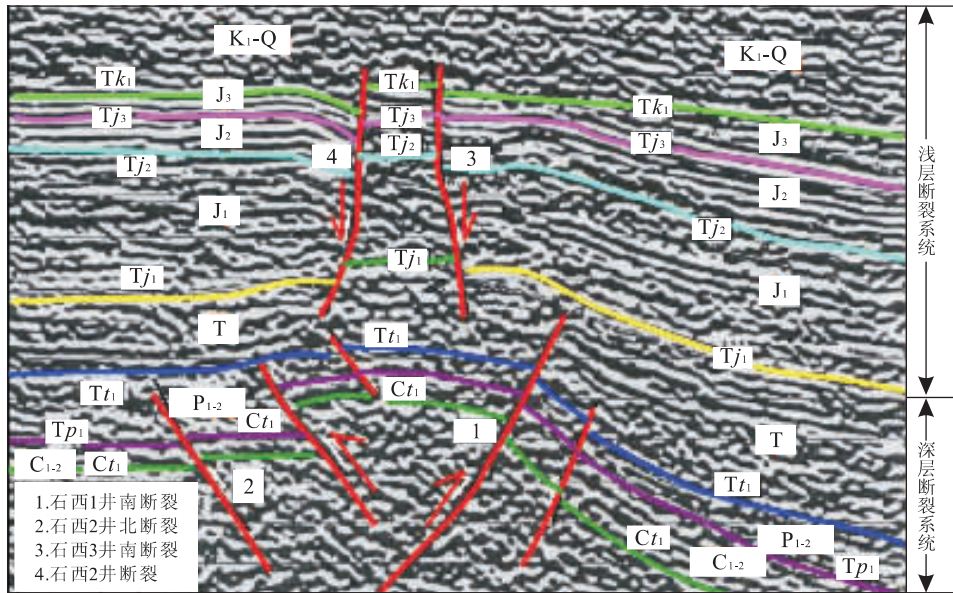


图 2 准噶尔盆地腹部地区深、浅层断裂系统地震解释剖面

Fig. 2 Seismic interpretation of faults system in the deep and shallow layer in the central part of Junggar basin

1.2 断裂控油模式

准噶尔盆地断裂比较发育,主要的油气聚集带主要沿大断裂带分布,具有明显的断裂控油特征(图 1)。深、浅层断裂系统在剖面上直接相交呈 Y 字型组合或以不整合面相连(图 2),断裂具有继承性发育的特征,对准噶尔盆地腹部地区油气的运移和聚集成藏起着重要的控制作用。如盆地腹部莫北地区深层断裂在海西期和燕山期的活动,断裂纵横向具有良好的开启性,并且越靠近烃源区活动强度越大,开启性越好,成为深部流体向浅部储层运移的主要通道;浅层断裂在中晚侏罗世至早白垩世燕山期的活动和开启,则是盆地腹部浅层油气运移聚集的重要成藏期。

钻探证实,准噶尔盆地腹部地区石南—石西—莫北地区无烃源岩或烃源岩较薄,不具备生烃条件,其油气主要来源于盆 1 井西凹陷的二叠系佳木河组(P_{1j})、风城组(P_{1f})和下乌尔禾组(P_{2w})烃源岩。因此,该油气藏形成属于源外断控式成藏。其中,石炭系—二叠系—三叠系(C-P-T)的深层断裂系统是本区主要油源断裂,它沟通了盆 1 井西凹陷烃源区和陆梁隆起区,使烃源岩区生成的油气沿断裂向隆起区运移。而与深层断裂构成“Y”字型组合的浅层侏罗系正断层主要是陆梁隆起区中深层的油气向浅层运移的通道。该地区断裂与油气运聚关系具有两种模式,主要由断裂活动方式、时期和组合形式决定。

第一种运聚模式:海西期—印支期形成的断裂,

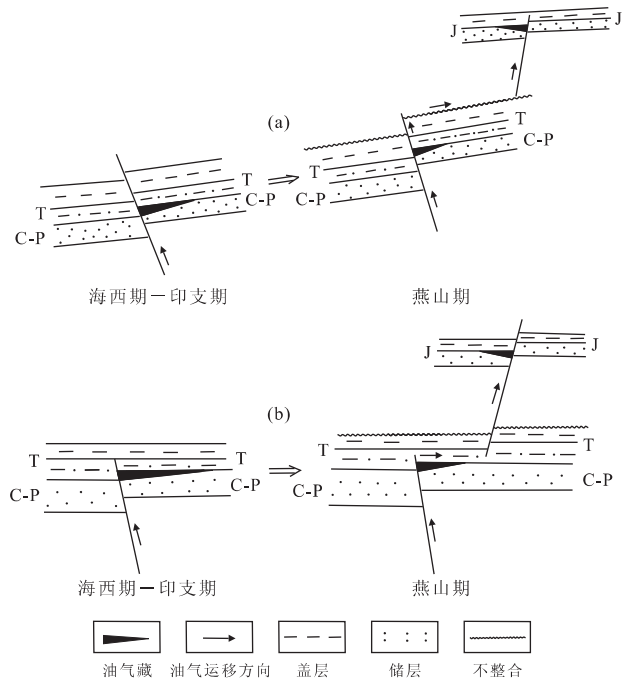


图 3 准噶尔盆地腹部地区断裂与油气运聚关系模式

Fig. 3 Relation model of faults and petroleum migration and accumulation in the central part of Junggar basin

向上断穿三叠系,断层与盖层共同遮挡,形成石炭系—二叠系油气藏。燕山期,深层逆断层重新活动,与不整合面一起构成油气向浅层运移的通道,并继续向上沿侏罗系正断层运移,在途中遇到合适的圈闭就聚集成藏(图 3a)。

第二种运聚模式:海西期—印支期形成的断裂,

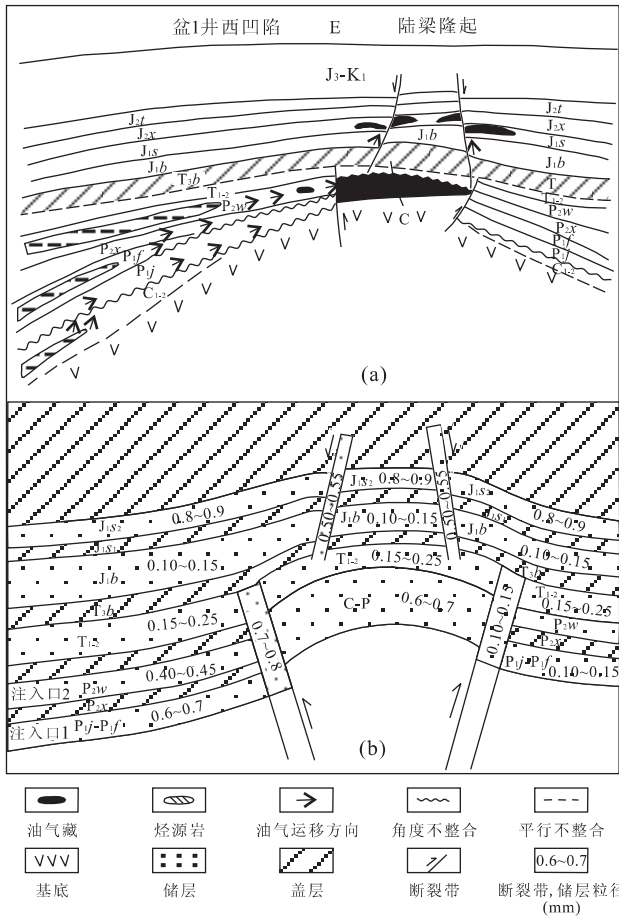


图 4 准噶尔盆地腹部石南—石西—莫北地区断裂控油模式 (a)和实验模型(b)

Fig. 4 The model of faults controlling oil migration and accumulation (a) and experimental model (b) of faults controlling oil in the Shinarump-Shixi-Mobei area of central part of Junggar basin

并未断穿三叠系,在三叠系白碱滩组区域性盖层下油气先在石炭系和二叠系聚集成藏。燕山期,深层断裂重新活动,但并未断至侏罗系,而侏罗系形成的正断层向下断入三叠系,此时深、浅层断裂与三叠系下部储层共同构成了油气纵、横向运移通道,使深层油气向上运移到浅层储层中聚集成藏(图 3b)。综上所述,盆地腹部石南—石西—莫北地区断裂控油模式为源外沿梁断控运聚成藏(图 4a)。

2 实验模型及步骤

2.1 实验模型建立

依据准噶尔盆地腹部地区石南—石西—莫北地区的断裂控油模式,在考虑了该地区各层系储层物性和非均质程度、断层组合类型、断层规模、活动时

期、活动强度和断层与储盖层配置关系以及断裂(带)渗透性的基础上,设计出了在深、浅两套不同性质断裂输导体系下的石油运聚模拟的实验模型(图 4b)。实验模型中各层系储层粒径(均值 D)的选取,主要参考已发现的石西、石南和莫北油气藏中各地层组段岩性组合特征及实测储层物性平均孔隙度和渗透率参数(φ, K)(表 1)。实验模型中不同粒级的渗透率值(K)与储层粒径(D)关系为: $K = D^2 \times 74\ 000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,区域性盖层设计为硅胶层。

实验模型中的深、浅层断裂带宽度和表征其渗透率的砂岩粒径的选取,主要是根据盆地腹部地区深、浅层断层规模的相对大小和断面倾角及断裂活动强度等参数进行确定。石南—石西—莫北地区临近盆 1 井西生油凹陷的深层油源断裂断距大,主要活动期为海西中晚期和燕山早中期,分别与盆 1 井西生油凹陷二叠系风城组(P_1f)和下乌尔禾组(P_2w)等 2 个烃源岩层的主要生排烃期相对应、断裂活动强度大、断裂开启性好,故深层断裂带的宽度选取较大,为 2 cm,断裂带砂岩粒径选取较粗,为 0.7~0.8 mm,断面倾角为 70°。浅层正断层的断距小,主要活动时期为燕山期、活动强度小,张性正断层的开启性较好,故浅层断裂带的宽度取 1 cm;断裂带砂岩粒径选取较细,为 0.5~0.55 mm,断面倾角为 80°;紧邻盆 1 井西生油凹陷深层油源断层下盘的二叠系风城组(P_1f)和下乌尔禾组(P_2w)两套烃源岩层在海西中晚期和燕山早中期向深层断裂带的排烃供油,是由分别设置在这两套烃源岩层中部的 2 个注油口和逆断层下盘两套储层物性较好的砂岩输导层实现的,考虑到风城组(P_1f)烃源岩层的生油能力较下乌尔禾组(P_2w)烃源岩层的强,故对应的两套砂岩输导层的粒径分别取 0.6~0.7 mm 和 0.4~0.45 mm。断裂带顶部和断层两侧储层中没有设置流体出口,即实验是在封闭体系内进行的。

对于准噶尔挤压性盆地中“深源浅聚”型油气成藏模式来说,由于压扭性断裂容易形成封闭,因此,在这类盆地中,研究断裂的开启性比封闭性显得更加重要。故实验条件设定在区域性保存条件好和断层相对开启状态下,运用物理模拟方法来研究准噶尔盆地腹部地区深浅层断裂带及其两侧岩层组合和储层物性差异对油气运移和聚集的影响,了解石油在断裂输导体系中运移的优势方向、路径和聚集位置及聚油量;再现盆地腹部地区断裂输导体系中石油运移和聚集的过程和特征。

模拟实验为二维小模型,它主要由 4 部分组成,

表 1 实验模型中储层物性参数选取

Table 1 Reservoir physical property parameters for the experimental model

| 层系 | 孔隙度(%) | 渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$) | 储层质量 | 代表地区 | 模型中储层粒径(mm) |
|---------------------|--------|--------------------------------|------|------|-------------|
| 头屯河组(J_2t) | 6.80 | 0.15 | 差 | 莫北地区 | 硅胶 |
| 西山窑组(J_2x) | 7.30 | 0.12 | 差 | 莫北地区 | 硅胶 |
| 三工河组二段(J_{1s2}) | 14.06 | 29.47 | 好 | 莫北地区 | 0.80~0.90 |
| 八道湾组(J_1b) | 9.27 | 0.41 | 较差 | 莫北地区 | 0.10~0.15 |
| 百口泉组(T_1b) | 9.64 | 0.86 | 较差 | 夏盐地区 | 0.15~0.25 |
| 石炭系一二叠系(C-P) | 14.20 | 6.27 | 好 | 石西地区 | 0.60~0.70 |

即模型本体、流体注入系统、测量系统和数据采集处理系统。模型本体是模拟实验装置的核心,长、宽、厚度分别为 $50 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$,工作压力为 0.5 MPa ,温度为小于 $150 \text{ }^\circ\text{C}$,倾斜角度为 $0^\circ \sim 20^\circ$,旋转角度为 $0^\circ \sim 360^\circ$,测量孔数是 60,注入、输出孔数分别为 24;流体注入系统是用泵输送流体,目前使用的注入泵为美国 ISCO100DX 微量注射泵,注入流体流量和注入压力大小可由注射泵控制器调节和测定;测量系统主要包括输出流体流量测量、温度测量和压力测量,输出流体测量用玻璃量筒收集并计量;温度测量用热电偶测定,压力用电容式压力传感器测定;数据采集和处理系统主要由 HP 公司 HD-2000 型数据采集器、OLymPus 数码相机和计算机组成。其中温度和压力均由 HD-2000 型数据采集器采集和处理。油气运移和聚集图象采集利用 OLymPus 数码相机和计算机完成。实验用砂为沈阳玻璃珠厂生产的各种粒度的纯净白色石英砂。石英砂为亲水性、润湿角近于 0° 。实验用水为蒸馏水,密度为 1.0 g/cm^3 ,粘度($25 \text{ }^\circ\text{C}$)为 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。为了使油水间有明显的反差,用微量天然色素将煤油染成棕红色。实验用油为中性煤油,密度为 0.75 g/cm^3 ,粘度($25 \text{ }^\circ\text{C}$)约为 $42 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

2.2 实验步骤

首先将实验模型充满水,然后将不同粒度的亲水石英砂分层装入模型,边装边振动,使砂子充分压实;确定孔隙度和渗透率;用平流泵向模型中注入蒸馏水,将模型中的气体驱出,直到注入量等于输出量,使模型中饱和水为止。再用 ISCO100DX 泵注入油,根据实验情况确定油的注入量和注入速率,注入量和注入压力可通过 ISCO100DX 泵计量,一般注入速率为 $0.05 \sim 0.1 \text{ mL/min}$,用玻璃量筒收集出液的油、水量并读数计量;对实验过程中模型内石油在深、浅层断裂带及其两侧储集层中的运移聚集过程进行观察和照相,同时记录注入量,注入压力和测定含油饱和度。实验结束后,将含油的砂子取出,用二

氯甲烷将油洗出,然后在 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右的温度下抽提。由于二氯甲烷的沸点为 $38 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$,因此,抽提一段时间后,只剩下油和水,计量油和水的数量。通过计算油在油、水总量中的百分比可得到含油饱和度。

3 实验过程与结果

3.1 实验过程

(1)从注入口以 2 mL/min 的速率向制作好的实验模型注水,直到进、出水的速率基本相等时,则认为模型已饱和水,然后停止注水并关闭出水口。

(2)由模型注入口 1 以 0.1 mL/min 的速率注油(图 5a),即相当于盆 1 井西凹陷二叠系第一套佳木河组和凤城组($P_{1j} + P_{1f}$)烃源岩层开始排烃,注入的石油在佳木河组和凤城组($P_{1j} + P_{1f}$)砂层中向深层断层处运移,并迅速进入断层内,很快运移到断层的顶部(图 5b),之后开始向断裂上盘石炭系一二叠系(C-P)物性较好的储层中运移(图 5c),当注入 $2 \text{ h } 12 \text{ min}$ 时,注入油量为 13.93 mL ,深层断层上盘石炭系一二叠系(C-P)储层中基本上被油充满,并已开始向其上方物性较差的三叠系下部储层中扩散(图 5d),然后,放慢注油速率,改为 0.05 mL/min ,至 $3 \text{ h } 9 \text{ min}$ 时,关闭注入口 1,此时注油量为 19.03 mL ,断裂带顶部的油在浮力作用下已开始沿其上盘三叠系下部储层向上运移到了浅层断裂下部(图 5e)。

(3)再由注入口 2 开始注油,即相当于盆 1 井西凹陷二叠系第二套下乌尔禾组(P_{2w})烃源岩层开始排烃,注入油的速率仍为 0.05 mL/min 。在注入口 2 注入的油尚未达到深层断层时,断裂下盘佳木河组和凤城组($P_{1j} + P_{1f}$)砂层内油在浮力作用下仍不断向上运移到断层内,并在浅层断层内油向上运移到了断层顶部;同时,深层断裂上盘石炭系一二叠系(C-P)储层已聚集的油也向上朝浅层断裂底部扩散(输导),已有少量油通过三叠系下部储层进入到

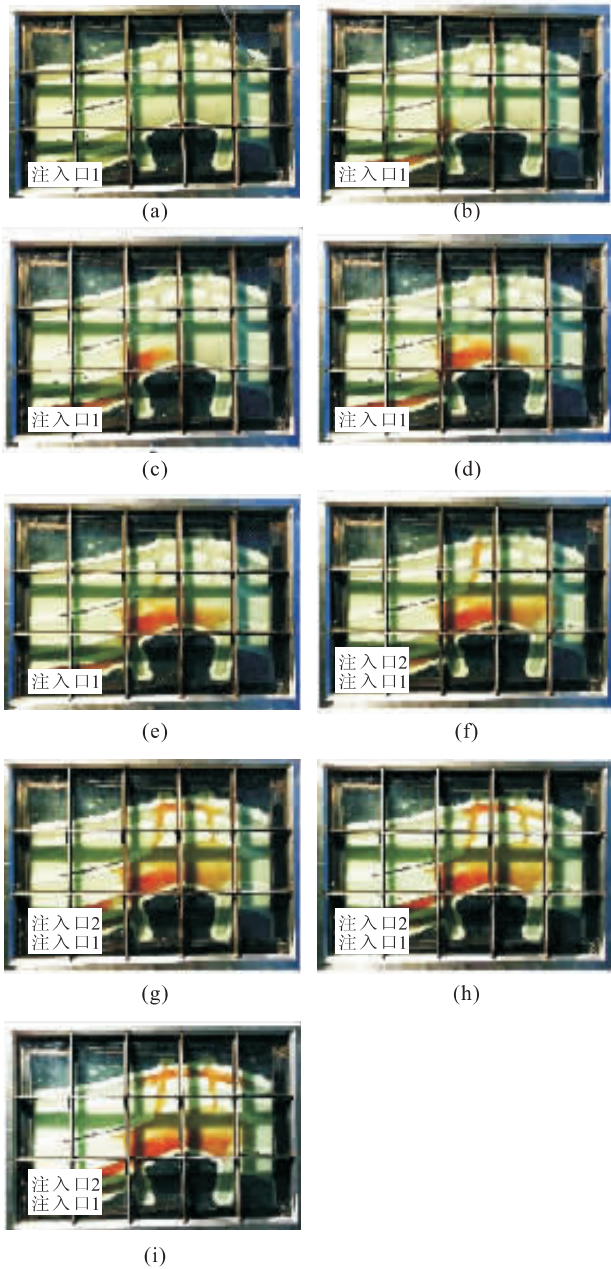


图 5 准噶尔盆地腹部断裂系统控油物理模拟实验

Fig. 5 Experimental simulation of faults controlling oil migration and accumulation in the central part of Junggar basin

浅层断裂中(图 5f),并向浅层断裂两侧的储层中运移(图 5g),当注入时间为 7 h 15 min、注入油量为 34.92 mL 时,从注入口 2 注入的油已进入深层断层中,并向上运移,此时,浅层断层上盘物性好的侏罗系下统三工河组二段(J_{1S_2})储层开始进油(图 5h)。随着从注入口 2 继续注油,深层断层中的油和上盘石炭系—二叠系(C-P)已聚集的油继续向上运移,向浅层断层供油,而且浅层断裂上盘三工河组二段

(J_{1S_2})储层中的油不断增加,并沿储层向前较差的八道湾组(J_{1b})储层中几乎没有进油(图 5i)。此时,总的注油量为 49.94 mL,结束注油。

(4)测量断裂带及其两侧储层中的含油饱和度。结果为在深、浅层断裂带和断裂上盘上倾方向中的储层含油饱和度较大,在 80%~90%之间,储层中聚集油量较多,含油丰富;而在断裂下盘的储层中,含油饱和度较低,为 8%~15%,含油量约 2~3 mL。

3.2 实验结果

根据对物理模拟实验过程的观察和断裂带及储层中含油饱和度数据综合分析得出了以下实验结果:

(1)当断层带的渗透率明显大于其两侧砂层的渗透率时,石油主要沿断层带垂向运移,而在断裂带两侧砂层中基本不发生运移,此时准噶尔盆地腹部地区的深、浅层断层均是石油向上运移的主要输导体。高渗透率断裂带是石油优势运移的通道,具有快速运移的特点,断裂带渗透率大小决定着石油的运移方向和路径。

(2)石油在高渗透率断层带快速向上运移,其含油饱和度表现为自上而下的增加,在断裂带含油饱和度向下增加的过程中,石油优先进入断裂带上盘石炭系—二叠系(C-P)和侏罗系三工河组二段(J_{1S_2})渗透率较大的砂层中,随后再进入断裂下盘相应的砂层中。随着断裂带含油饱和度的进一步增加,储层物性好的砂层中进油量不断增加,并在此砂层中进行侧向运移,最终成藏。而物性较差的砂层很少有油进入,如八道湾组(J_{1b})砂层,这与钻探结果相符,即从物理模拟实验说明了盆地腹部地区八道湾组(J_{1b})砂岩层中含油性差的原因。

4 成藏意义

(1)从物理模拟实验进一步验证了断裂带是含油气流体运移的优势通道和油气在断裂带中的运移受“地震泵”作用控制的认识。模拟结果很好地解释了在准噶尔盆地腹部地区海西运动中晚期和燕山运动早中期 2 个油气成藏的关键时期,伸入盆 1 井西凹陷二叠系烃源区的深层逆断裂,在关键成藏期活动的断裂处于相对开启状态,完全可以成为深部烃源岩生成的油气向浅部储层运移的良好通道,而且在多期构造运动的作用下,断裂多期活动可以多次抽提深层油气,并沿断裂带呈“幕式”垂向运移,揭示了油气沿断

裂垂向运移是受“地震泵”作用控制的机理。

(2)模拟实验证明了在断裂带顶部存在盖层封闭的条件下,封盖层之下的断裂在输导油气向上运移时,油气在浮力及构造应力和流体压力梯度作用下,断裂带内含油气流体优先进入断裂上盘储层,并且随着断裂带含油饱和度自上而下增加,后期在较高流体压力梯度作用下,进行侧向运移和聚集成藏,尔后再进入同时代物性相近的断裂下盘储层,且石油的进入量较少。而断裂两侧那些排替压力较大,物性较差的储层中,进油量则很少,如八道湾组(J_1b)砂层和中下三叠统(T_{1-2})砂层。

(3)模拟实验过程与结果揭示了准噶尔盆地腹部地区深、浅层断裂输导体系下石油运移和聚集特征。实验结果可以由准噶尔盆地腹部地区浅层断裂两侧同一储层流体地球化学分析测试结果的对比得到佐证:(a)断裂下盘记录的含油气流体的次数和有机包裹体丰度均明显小于上盘;(b)横向上,离断裂带越近,有机包裹体丰度越高;(c)断裂上盘储层流体包裹体的盐度高、成分复杂,下盘储层中的盐度低、成分单一;(d)断裂带附近砂岩溶蚀现象十分严重,而且断裂上盘砂岩溶蚀作用普遍,而下盘同一砂岩只有轻微溶蚀。这些流体地球化学特征均反映出了油气的确是沿断裂带进入两侧储层中。而且是断裂上盘储层进入含油气流体期次多、持续时间长,有机包裹体丰度高,进油量多。这与物理模拟实验观察到石油在断裂两侧储层中的运移情况完全相符。

5 结论

(1)高渗透性断裂带的确是油气快速运移的优势通道,当断层带的渗透率明显大于其两侧砂层的渗透率时,石油主要沿断层带垂向运移。准噶尔盆地腹部地区深、浅层断层均是石油向上运移的主要输导体,断裂带渗透率大小决定着石油运移的方向和路径。

(2)在断层带顶部存在盖层封闭的条件下,石油在断层带中不均匀地向上运动,断层带中含油饱和度自上而下增加,在向下增加的过程,石油倾向于在区域性盖层之下储层物性好的砂层中运移,而且优先进入断裂上盘渗透率较大的砂层中,随着断裂带含油饱和度的不断增加和断裂上盘储层物性好的砂层中进油量不断增多,进行侧向运移,最终聚集成藏,尔后再进入断裂下盘相应的砂层中,油量较少;而物性较差的砂层中很少有石油进入。

(3)模拟实验过程与结果比较好地揭示了准噶尔盆地腹部地区深、浅层断裂输导体系下石油运移和聚集特征,解释了盆地腹部地区八道湾组(J_1b)砂岩层中含油性差的原因;实验结果可以由准噶尔盆地腹部地区浅层断裂两侧同一储层流体地球化学分析测试结果的对比得到佐证。

References

- Allan, U. S., 1989. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures. *AAPG Bulletin*, 73(7): 803–811. doi: 10.1306/44B4A271-170A-11D7-8645000102C1865D
- Antonellini, M., Aydin, A., 1994. Effect of faulting on fluid in porous sandstones; petrophysical properties. *AAPG Bulletin*, 78(3): 355–377.
- Antonellini, M., Aydin, A., 1995. Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones; geometry and spatial distribution. *AAPG Bulletin*, 79(5): 642–671. doi: 10.1306/8D2B1B60-171E-11D7-8645000102C1865D
- Berg, R. R., Avery, A. H., 1995. Sealing properties of Tertiary growth faults, Texas Gulf Coast. *AAPG Bulletin*, 79(3): 375–392. doi: 10.1306/8D2B1534-171E-11D7-8645000102C1865D
- Bouvier, J. D., Kaars-Sijpesteijn, C. H., Kluesner, D. F., 1989. Three-dimensional seismic interpretation and fault sealing investigation, Nun River Field, Nigeria. *AAPG Bulletin*, 73(11): 1397–1414. doi: 10.1306/44B4AA5A-170A-11D7-8645000102C1865D
- Chen, F. J., Tian, S. C., 1989. Compaction and hydrocarbon migration. China University of Geosciences Press, Wuhan, 26–38 (in Chinese).
- Chen, H. H., Li, S. T., 1996. New development in active thermal fluids and hydrocarbon accumulation and mineralization. *Earth Science Frontiers*, 3(3–4): 259–262 (in Chinese with English abstract).
- Ding, W. L., Jin, Z. J., Zhang, Y. J., et al., 2002. Fault controls on oil and gas in Junggar basin, Xinjiang. *Earth Science Frontiers*, 9(3): 102 (in Chinese with English abstract).
- Du, C. G., Hao, F., Zou, H. Y., et al., 2007. Progress and problems of faults conduit systems for hydrocarbon migration. *Geological Science and Technology Information*, 26(1): 51–56 (in Chinese with English abstract).
- Engelder, J. T., 1974. Cataclasis and the generation of fault gouge. *Geological Society of American Bulletin*, 85(10): 1515–1522. doi: 10.1130/0016-7606(1974)85<1515
- Gao, J., Lü, Y. F., Tian, Q. F., 2009. Analysis of hydrocarbon migration through the fault based on the interior structure

- of fault zone. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 31 (2): 4—7, 122 (in Chinese with English abstract).
- Gibson, R. G., 1994. Fault-zone seals in Siliciclastic strata of the Columbus basin, offshore Trinidad. *AAPG Bulletin*, 78 (9): 1372—1385. doi: 10. 1306/A25FECA7—171B—11D7—8645000102C1865D
- Hao, F., Cai, D. S., Zou, H. Y., et al., 2004. Overpressure-tectonic activity controlled fluid flow and rapid petroleum accumulation in Bozhong depression, Bohai Bay basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29 (5): 518—524 (in Chinese with English abstract).
- Harding, T. P., Tuminas, A. C., 1988. Interpretation of footwall (lowside) fault traps sealed by reverse faults and convergent wrench faults. *AAPG Bulletin*, 72(6): 738—757. doi: 10. 1306/44B4A271—170A—11D7—8645000102C1865D
- Harding, T. P., Tuminas, A. C., 1989. Structural interpretation of hydrocarbon traps sealed by basement normal block faults at stable flank of foredeep basins and at rift basins. *AAPG Bulletin*, 73(7): 812—840.
- 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).
- Hua, B. Q., 1995. Stress field, seismic pumping and oil-gas migration. *Acta Sedimentologica Sinica*, 13(2): 77—85 (in Chinese with English abstract).
- Hou, P., Luo, X. R., Zhou, B., et al., 2005. An experimental study of episodic oil migration. *Xinjiang Petroleum Geology*, 26(1): 33—35 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z. X., Pang, X. Q., Zeng, J. H., et al., 2005. Research on types of the dominant migration pathways and their physical simulation experiments. *Earth Science Frontiers*, 12 (4): 507—516 (in Chinese with English abstract).
- Knipe, R. J., 1992. Faulting processes and fault seal. NPF, Special Publications 3, Elsevier, Amsterdam, 325—342.
- Knipe, R. J., 1997. Juxtaposition and seal diagrams to help analyze fault seals in hydrocarbon reservoirs. *AAPG Bulletin*, 81(2): 187—195. doi: 10. 1306/522B42DF—1727—11D7—8645000102C1865D
- Li, Z. H., Tang, L. J., Ding, W. L., et al., 2002. Fault characteristic analysis for the hinterland of Junggar basin. *Petroleum Exploration and Development*, 29(1): 40—43 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. D., Wu, K. Y., Zha, M., 2002. Draining capacity of fault zone as a pathway of oil and gas leakage. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 26 (1): 16—22 (in Chinese with English abstract).
- Lu, B., Ding, W. L., Liu, Z., et al., 1998. Advances of research on fault sealing. *Geological Science and Technology Information*, 17(3): 75—80 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Z. J., Qu, G. S., Li, T., et al., 2008. Tectonic coupling and segmentation of marginal structural belt in Junggar basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 29(3): 271—277 (in Chinese with English abstract).
- Qiao, H. S., Niu, J. Y., Wang, M. M., 1999. The principle and exploration practice of hydrocarbon accumulation sealed by backward faults in deep formations of eastern China. *Petroleum Exploration and Development*, 26 (6): 10—13 (in Chinese with English abstract).
- Shang, E. J., Jin, Z. J., Ding, W. L., et al., 2005. Study on physical simulation experiment for the controlling of faults to oil—taking the Hongche faults in the northwest of Junggar basin as an example. *Petroleum Geology and Experiment*, 27(4): 414—418 (in Chinese with English abstract).
- Smith, D. A., 1966. Theoretical consideration of sealing and non-sealing faults. *AAPG Bulletin*, 50(2): 363—374.
- Smith, D. A., 1980. Sealing and non-sealing faults in Louisiana Gulf Coast salt basin. *AAPG Bulletin*, 64(2): 145—172. doi: 10. 1306/2F918946—16CE—11D7—8645000102C1865D
- Sun, Y. H., Fu, X. F., Lü, Y. F., et al., 2007. Suction role of seismic pumping and physical simulation on hydrocarbon migration and accumulation. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(1): 98—104, 111 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. C., Wang, S. N., 2009. Controlling of the match of source rock, overpressure and fault on oil accumulation of Fuyang oil layer in Sanzhao depression. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(4): 656—661 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. L., Zhang, Y. J., Wang, G. H., et al., 2002. Achievements and prospect for petroleum exploration and development in Junggar basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 23 (6): 449—455 (in Chinese with English abstract).
- Watts, N. L., 1987. Theoretical aspects of cap-rock and fault seal for single- and two-phase hydrocarbon columns. *Marine and Petroleum Geology*, 4 (4): 274—307. doi: 10. 1016/0264—8172(87)90008—0
- Watts, N. L., Kaars Sijpestein, C. H., Osai, L. N., et al., 1991. Dynamic leakage of faults during differential depletion; theory, models, and examples from the Niger Delta (abs.). *AAPG Bulletin*, 75: 1424. doi: 10. 1306/0C9B1D63—1710—11D7—8645000102C1865D
- Weber, K. J., Mandl, G., Pilaar, W. F., et al., 1978. The role of faults in hydrocarbon migration and trapping in Nige-

- rian growth fault structures. *Tenth Annual offshore Technology Conference Proceedings*, 4: 2643—2653.
- Wu, K. Y., Zha, M., Wang, X. L., et al., 2005. Fault controls on oil and gas in the Mosuowan area, Junggar basin. *Journal of Geomechanics*, 11(1): 60—66 (in Chinese with English abstract).
- Yang, R. J., Xie, Z. W., Cheng, S. D., 2006. Physical simulation of the effect of faults on migration and accumulation of Ke-la 2 gas field. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 30(3): 11—13, 144 (in Chinese with English abstract).
- Yielding, G., Freeman, B., Needham, D. T., 1997. Quantitative fault seal prediction. *AAPG Bulletin*, 81(6): 897—917.
- Yu, C. L., Zeng, J. H., 2005. Features of fluid migration and hydrocarbon accumulation in the active and intermittent stages of fault episodic activities. *Petroleum Geology and Experiment*, 27(2): 129—133 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. P., Wang, Y., Yun, J. B., et al., 2009. Control of faults at different evolution stages on hydrocarbon accumulation in Tazhong area, the Tarim basin. *Oil and Gas Geology*, 30(3): 316—323 (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 Yanchang Formation, Upper Triassic, Ordos basin. *Petroleum Exploration and Development*, 30(5): 1—5 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, J. H., Jin, Z. J., 2000. The physical simulation on secondary hydrocarbon migration and accumulation. Petroleum Industry Press, Beijing, 1—12 (in Chinese).
- Zeng, J. H., Wang, H. Y., 1999. An experimental study of petroleum migration and accumulation in carrier bed and lithological trap. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(2): 193—196 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈发景, 田世澄, 1989. 压实与油气运移. 武汉: 中国地质大学出版社, 26—38.
- 陈红汉, 李思田, 1996. 活动热流体与成藏、成矿动力学研究进展. *地学前缘*, 3(3—4): 259—262.
- 丁文龙, 金之钧, 张义杰, 等, 2002. 新疆准噶尔盆地断裂控油气作用机理研究. *地学前缘*, 9(3): 102.
- 杜春国, 郝芳, 邹华耀, 等, 2007. 断裂输导体系研究现状及存在的问题. *地质科技情报*, 26(1): 51—56.
- 高君, 吕延防, 田庆丰, 2009. 断裂带内部结构与油气运移及封闭. *大庆石油学院学报*, 31(2): 4—7, 122.
- 郝芳, 蔡东升, 邹华耀, 等, 2004. 渤中坳陷超压—构造活动联控型流体流动与油气快速成藏. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(5): 518—524.
- 华保钦, 1995. 构造应力场、地震泵和油气运移. *沉积学报*, 13(2): 77—85.
- 侯平, 罗晓容, 周波, 等, 2005. 石油幕式运移实验研究. *新疆石油地质*, 26(1): 33—35.
- 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.
- 姜振学, 庞雄奇, 曾溅辉, 等, 2005. 油气优势运移通道的类型及其物理模拟实验研究. *地学前缘*, 12(4): 507—516.
- 李振宏, 汤良杰, 丁文龙, 等, 2002. 准噶尔盆地腹部地区断裂特征分析. *石油勘探与开发*, 29(1): 40—43.
- 柳广弟, 吴孔友, 查明, 2002. 断裂带作为油气散失通道的输导能力. *石油大学学报(自然科学版)*, 26(1): 16—22.
- 鲁兵, 丁文龙, 刘忠, 等, 1998. 断层封闭性研究进展. *地质科技情报*, 17(3): 75—80.
- 马宗晋, 曲国胜, 李涛, 等, 2008. 准噶尔盆地盆山构造耦合与分段性. *新疆石油地质*, 29(3): 271—277.
- 谯汉生, 牛嘉玉, 王明明, 1999. 中国东部深部层系反向断层遮挡聚油原理与勘探实践. *石油勘探与开发*, 26(6): 10—13.
- 尚尔杰, 金之钧, 丁文龙, 等, 2005. 断裂控油的物理模拟实验研究——以准噶尔盆地西北缘红车断裂带为例. *石油实验地质*, 27(4): 414—418.
- 孙永河, 付晓飞, 吕延防, 等, 2007. 地震泵抽吸作用与油气运聚成藏物理模拟. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(1): 98—104, 111.
- 王雅春, 王胜男, 2009. 源岩、超压和断裂空间匹配对三肇凹陷扶杨油层油成藏的控制作用. *吉林大学学报(地球科学版)*, 39(4): 656—661.
- 王宜林, 张义杰, 王国辉, 等, 2002. 准噶尔盆地油气勘探开发成果及前景. *新疆石油地质*, 23(6): 449—455.
- 吴孔友, 查明, 王绪龙, 等, 2005. 准噶尔盆地莫索湾地区断层控油作用. *地质力学学报*, 11(1): 60—66.
- 杨荣军, 谢志巍, 成世东, 2006. 断裂在克拉2气田运聚成藏作用中的物理模拟. *大庆石油学院学报*, 30(3): 11—13, 144.
- 于翠玲, 曾溅辉, 2005. 断层幕式活动期和间歇期流体运移与油气成藏特征. *石油实验地质*, 27(2): 129—133.
- 张仲培, 王毅, 云金表, 等, 2009. 塔中地区断裂不同演化阶段对油气聚集的控制. *石油与天然气地质*, 30(3): 316—323.
- 赵文智, 胡素云, 王泽成, 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): 1—5.
- 曾溅辉, 金之钧, 2000. 油气二次运移和聚集物理模拟. 北京: 石油工业出版社, 1—12.
- 曾溅辉, 王洪玉, 1999. 输导层和岩性圈闭中石油运移和聚集模拟实验研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 24(2): 193—196.