

文章编号: 0253-9985(2005)05-0563-09

构造应力在油气运聚成藏过程中的作用

王 毅¹, 宋 岩², 单家曾³

(1 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083 2 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

3 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 油气运移是各种因素综合作用的结果,但在构造活动期,构造应力是油气运聚的主要驱动力。构造应力引起的沉积岩石变形导致构造应力场呈非均一性的分布,形成若干个能量汇聚或耗散中心,为石油和天然气的运移和聚集提供驱动力,油气从高势区向低势区运移。油气运移具有沿破裂和断层向上运聚和从凹陷中心向周边运聚的趋势。破裂和断层为油气的运移提供了有利通道。准噶尔盆地在印支期和喜山期的构造运动最为强烈,构造运动对油气运聚的控制作用最大。印支期控制的石炭—二叠系油气系统,油气运移方向基本平行最大主应力梯度值的方向,油气运移从高值应力区向低值应力区运移,已探明的油气藏主要分布在主应力低值区以及应力等值线密集区的两侧。喜山期控制的侏罗系及第三系油气系统油气运聚主要发生在构造变形强烈的盆地南缘地区,油气总体运聚方向表现由南缘生油凹陷高值应力区指向北部低值应力区。盆地南部的呼图壁、车排子地区(独山子)、马桥和白家海等局部的构造应力低值区是油气富集成藏的有利地区。

关键词: 构造应力; 油气运聚; 物理模拟; 成藏动力学; 构造活动期

中图分类号: TE112.1 **文献标识码:** A

Action of tectonic stress on hydrocarbon migration and accumulation

Wang Yi¹, Song Yan², Shan Jiazeng³

(1 Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing;

2 Exploration and Development Research Institute, PetroChina, Beijing;

3 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing)

Abstract Hydrocarbon migration and accumulation are the results of combined action of various factors, but tectonic stress is the main driving force of hydrocarbon migration and accumulation during tectonic active period. Sedimentary rock deformation caused by tectonic stress results in heterogeneous distribution of tectonic stress field with several concourse and dissipation centers of energy, driving oil and gas to migrate from high potential area to low potential area. Hydrocarbons tend to migrate upward along fractures and faults and from the sag center to its periphery area. Fractures and faults act as the favorable pathways of hydrocarbon migration. Tectonic movements were most intensive during Indosinian and Himalayan in Junggar basin and had the largest control on hydrocarbon migration and accumulation. As for the Permian-Carboniferous petroleum system controlled by Indosinian tectonic movement, the direction of hydrocarbon migration was basically in parallel with the maximum major stress gradient, and hydrocarbons migrated from high stress area to low stress area. The discovered oil and gas reservoirs are mainly distributed in the low major stress area and on both sides of area with dense stress contour lines. While the Tertiary petroleum system controlled by Himalayan tectonic movement, hydrocarbon migration and accumulation mainly occurred in the southern edge of the basin with strong tectonic deformation, and hydrocarbons have migrated from the high stress area on the southern edge of oil-generating depression to the low stress area in the north. The local low tectonic stress areas in the southern part of the basin, such as Hutubi

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2003CB214608)

第一作者简介: 王毅,男,44岁,教授,构造地质学与石油地质学

收稿日期: 2005-07-18

Chepaizi (Dushanzi), Maqiao and Baijiahai are favorable for hydrocarbons to enrich and accumulate

Key words tectonic stress; hydrocarbon migration and accumulation; physical modeling; reservoiring dynamics; tectonic active period

含油气盆地内构造应力在油气运聚过程中的作用问题是油气成藏动力学中的难题之一,迄今国内外的研究程度仍较低^[1]。过去石油地质学家们在强调异常地层压力、水动力、浮力和毛细管力在油气二次运移中的作用时,也认识到构造应力是油气运移的动力之一^[2~5]。Hubbert, Rouchet, England, Bredehoeft 和 Yassir 等对此均有分析,但多侧重于概念性的描述^[6~11]。本文以构造应力驱动油气运移动力学分析、物理与数学模拟实验为基础,以典型盆地油气区构造应力场的分布与油气分布的关系为依据,试图解决构造应力在油气运移聚集过程中对油气驱动作用的机理、方式以及含油气盆地中构造应力驱动油气运移的过程和模式问题。

1 动力学分析

1.1 基本原理

饱和流体的多孔介质是由固体颗粒构成的骨架和注满其间的流体组成,外力作用于多孔介质后,一部分应力由岩石骨架承受,称之为有效应力;另一部分则由孔隙中的流体来承受,这部分应力称为孔隙压力^[12]。即任一截面受到的总应力可以分为有效应力和孔隙压力两部分^[9],它们的关系满足

$$\sigma_{\text{总}} = \sigma' + P \quad (1)$$

式中 $\sigma_{\text{总}}$ 为任一截面受到的总应力, MPa; σ' 为有效应力, MPa; P 为孔隙压力, MPa

岩石变形的强度只取决于有效应力的大小,根据弹性变形理论原理^[13]

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\sigma'_0}{K} \quad (2)$$

式中 V 为岩层的体积, km^3 ; ΔV 为体积的变化量, km^3 ; σ'_0 为平均有效应力, MPa; K 为体积变形模量, MPa

因此,岩层的体积变化为^[14]

$$\Delta V = \frac{V\sigma'_0}{K} = \frac{V(\sigma_{\text{总}0} - P)}{K} \quad (3)$$

式中 $\sigma_{\text{总}0}$ 为总平均应力, MPa

而孔隙中的流体在流体压力 P 的作用下,发生体积变化 ΔV_v 为

$$\Delta V_v = \frac{\phi PV}{K_v} \quad (4)$$

式中 ϕ 为孔隙度; K_v 为孔隙中流体的压缩模量, MPa

因为骨架的体积压缩很小,可忽略不计,岩层的体积变化近似等于孔隙的体积变化^[15],所以式(3)与(4)应相等

$$\frac{V(\sigma_{\text{总}0} - P)}{K} = \frac{\phi PV}{K_v} \quad (5)$$

$$\frac{P}{\sigma_{\text{总}0}} = \frac{1}{1 + \frac{\phi K}{K_v}} = B \quad (6)$$

式中 B 为孔隙压缩系数。

对饱和岩层因为水的压缩性比岩层的压缩性低得多,即 K_v 远大于 K , K/K_v 近似等于 0 所以 B 近似等于 1。对于干岩层,孔隙的压力为 0 所以 B 近似等于 0。非饱和的湿岩层, B 为 0~1,饱和度越大, B 越接近于 1。对于饱和岩层,可以近似认为

$$\frac{P}{\sigma_{\text{总}0}} \approx 1 \quad (7)$$

上式说明,总应力全部由孔隙中的流体所承受,即总应力全部转为孔隙压力^[16]。实际上由于各种地质因素的复杂性,这是一种非常极端的流体异常高压情况,实际地质环境中很难完全达到总应力转化孔隙压力的转化极限,但它在一定程度上定量反映了构造应力驱动油气运移的动力学原理和基本关系。在油气运移过程中,完全封闭或不排水是特殊情况,随着流体的逐渐排出,孔隙压力及岩层的有效应力随时间会发生变化,总体来说是孔隙压力逐渐变小,而骨架上承受的有效应力逐渐增大的过程。

1.2 作用强度

在沉积储层中,构造应力通常为 5~150 MPa^[17,18],砂岩的杨氏模量 E 为 $1.0 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^4$ MPa,泊松比为 0.25~0.33。如果取砂岩的杨氏模量 E 为 0.5×10^4 MPa,泊松比为 0.3,据式(2)计算可得其体积应变为 $1.2 \times 10^{-3} \sim 3.6 \times 10^{-3}$ 。若孔隙度为 10%,则孔隙的相对体积变化约为 1.2%~3.6%。从计算结果可以看出,在中、低强度的构造应力作用下,孔隙体积的变化是十分有限的,只有在高强度的构造应力作用下,由应

力作用产生的体积变化才是显著的^[19]。实际地质环境中, 由于大部分时期平均构造应力值很小, 与其他因素相比较, 由构造应力引起的孔隙流体压力的变化远远不及其他因素的影响, 因此构造应力的影响是微不足道的。但是在构造运动的强烈活动期, 其平均构造应力值往往比一般地质时期高出一个以上数量级, 此时, 由构造应力引起的岩石破裂导致的孔隙流体压力的变化就非常重要, 它必然在很大程度上影响到油气运聚甚至成为油气运聚的主要驱动力。因此, 地下油气的运移是地下液体系统和固体系统相互作用的复杂过程。当我们把构造应力作为油气运聚的主要驱动力来讨论时, 只有在油气运聚期中构造运动强烈活动的时期才有意义。

不同性质的盆地, 构造应力的大小有很大的差别^[20~22]。挤压盆地的构造应力比伸展盆地的构造应力大一个数量级以上 (表 1)^[23]。一般来讲伸展盆地构造应力大约为 10MPa 数量级。根据上面的计算, 伸展盆地在构造应力的作用下产生的油气运移量较小 (孔隙相对体积的变化量小于 2%)。而挤压盆地的构造应力为 100~200MPa 数量级, 由构造应力作用产生的体积变化较大 (孔隙相对体积的变化量大于 5%)。所以, 挤压盆地可更清楚地显示出构造应力驱动油气的动力特征。

表 1 不同盆地发生断裂时的应力估算值表^[23]
Table 1 Estimated breaking stresses in various basins

埋深 /m	最大挤压应力 (挤压盆地) /MPa	最大张应力 (拉张盆地) /MPa
1 000	120	3
2 000	177	6
3 000	222	9

1.3 运移方向

构造应力对孔隙型储层中的流体的作用是通过固体骨架的变形及骨架和流体的相互作用来实现的^[24]。也就是说, 岩层在构造应力作用下发生岩石变形的同时, 岩石中的孔隙体积必然产生变化。孔隙体积的变化又会使岩层内孔隙流体压力产生变化, 导致岩层中孔隙流体产生压力梯度或势差。从而推动流体在岩层内流动, 使流体由高势区向低势区运移。在流动的过程中, 遇到合适的构造部位和应力环境, 油气聚集成藏。

在不考虑毛细管力情况下, 流体势的定义为

$$\Phi = \rho gh + \int_0^p \frac{dp}{\rho} \tag{8}$$

式中 Φ 为流体势, MPa; ρ 为流体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; h 为计算点相对于某一基准面的高度, m; P 为孔隙压力, MPa。

如果流体只沿水平方向流动, 则式 (8) 中的右端第一项可不考虑 (即不考虑重力的影响)。由构造应力场计算出孔隙流体压力, 再利用式 (8) 计算出流体的势, 划出流体势等值线。根据流体由高势区向低势区运移的规律, 找出流体运移的方向。

根据以上的分析, 在孔隙型储层中, 构造活动期构造应力是油气运聚的主导动力。根据流体势计算公式 (7, 8), 得出在孔隙储层中由应力引起的流体势部分决定于平均应力的大小, 可以把这部分流体势归为由应力作用造成的流体势部分。对于封闭型储层, 这部分流体势的改变虽然不能导致油气的运移, 但形成了压力封闭。而对于开放型孔隙储层, 根据流体势由高势区向低势区运移的规律, 油气将由高平均应力区流向低平均应力区, 流动方向垂直于平均应力等值线。所以, 成藏期间的主要构造活动期, 流体势场与构造应力场基本是一致的, 高应力区一般为高的流体势区, 低应力区一般为低的流体势区。低应力区一般有利于油气的聚集。由此可见, 尽管直接影响油气运移的驱动力是各种因素的综合作用, 但构造应力却是重要的因素之一, 尤其是成藏期间的主要构造活动期更是如此。同时, 岩石的变形也会导致孔隙度、渗透率的改变, 从而影响渗流的速度和方向。例如当应力积累达到临界破裂应力值时, 新破裂面的产生会导致应力值在一段时间内突然降低, 孔隙压力较高的流体顺此破裂面向应力低的方向运移, 促使流体压力重新分布。相对的张应力区有利于油气往这些断裂带附近运移。

2 物理模拟实验

2.1 实验方法

油气运聚是漫长的地质和物理过程, 当岩石或岩层受到应力作用时, 赋存在颗粒中间的流体发生运移^[25]。盆地内部在构造应力场作用下, 各种构造的形成和演化通常与油气的生成、运移和成藏相叠置。显然, 应力对于油气运移起到相当重要的驱动作用^[26]。但是, 在构造应力场作用下

岩石的构造变形与油气运聚在方向和时间上并非完全一致,构造应力场引起的岩层的构造变形与油气运聚方向和途径之间的叠置关系有待通过构造物理模拟实验给予深入研究。

本实验选取了对应于不同沉积层的 10 种实验材料(含油气替代物)(表 2)。在各项物理模拟实验中,油气的替代物是一重要的问题。为此,我们选用了以下 3 大类型的油气替代物: 油气混合物;④水气混合物和 ④天然气替代物。

2 2 结果分析

2 2 1 拉张应力场

初始实验模型设计: 实验模型初始长度为 300mm,单层厚度为 5~ 8mm,各沉积层自然均匀沉积,在近似等于 30 g/cm² 垂向压力作用下压实成层。驱动力为横向拉张应力场。实验中应用了沉积层形成与施加构造应力同步或交替实施的新的实验技术。初始实验模型由 5 层沉积盖层组成,6~ 10 层是在尔后的地质构造运动中陆续沉积的,相当于一边沉积一边施力的沉积变形过程。实验模型中红黄相间的标尺长度为 50mm。

实验过程: 随地质年代的增加各沉积岩层不断成岩的性质是通过 σ_3 作用实现的。实验是在 22~ 28℃条件下实施的。实验模型水平方向为 σ_1 作用方向(引张力),垂直方向为 σ_3 作用方向(最小主应

力)。实验结果通过摄像记录各阶段实验结果。油气混合物的生成是通过附件叠置在储层中的。

实验结果: 第一阶段,在引张构造应力场作用下,初始“沉积层”被拉长,颗粒间产生滑动,加之重力效应,形成正断层的雏形。第二阶段,随着上覆层系的不断加厚,实验中白色层(代表“烃源岩层”)中开始形成大量红色的油气混合物(油气)。第三阶段,正断层的上盘层系中形成的局部“背斜”部位是张应力的集中部位(局部应力低值区),在这种构造应力不均匀分布的环境下,红色的油气混合物首先向这些局部应力低值区运聚。第四阶段,随着张应力和上覆层的不断作用,沉积物非均匀分布的非均衡效应和构造应力场强弱非均匀分布的加强对油气混合物产生更大的驱动作用。正断层的演化为油气的运移提供了良好通道,正断层上盘向下位移对油气侧向运聚产生了近于垂直的压应力驱动作用,导致油气产生侧向运移;同时,来自生烃母岩的“天然气”迅速向物质质点排列松散和具备间隔(断层和裂隙面)的区域运移并在浮力作用下迅速移向顶部。照片中的左侧暗色区域是“天然气”聚集区,其上覆有“油气”藏流体压力过大而导致的张性裂隙。随着构造体系的演化,“油气”聚集量不断增加,成藏区域不断扩大(图 1)。

表 2 实验材料名称、颜色和主要作用

Table 2 Name color and main function of the materials used in physical simulation experiment

序号	实验材料名称	颜色	主要作用
1	染色的泥-砂混合物	绿色	具有与泥-砂岩相类似的力学性质,作为盖层实验材料
2	染色的泥-砂混合物	黄色	具有与砂-泥岩相类似的力学性质,作为盖层实验材料
3	染色的泥-砂混合物	红色	具有与砂-泥岩相类似的力学性质,作为盖层实验材料
4	天然石英砂	浅黄色	由不同粒径(0.098~ 0.45mm)石英砂组成,具有与砂岩相类似的力学性质,作为储层实验材料
5	利德粉	白色	具有与泥岩相类似的力学性质,作为烃源岩层实验材料
6	染色的泥岩	蓝色	具有与泥岩相类似的力学性质,作为沉积层实验材料
7	染色的泥-砂岩	深黄色	具有与泥砂岩相类似的力学性质,作为沉积层实验材料
8	滑石粉	白色	为减小摩擦阻力,有时施放在实验模型底部
9	凡士林+有机膨胀物	红色	凡士林是一种油性材料,有机膨胀物具有自然发泡功效,两种材料混合作为油气混合物替代物
10	空气+水	基本无色	作为水驱气的替代物
11	羧甲基纤维素(CMC)+有机膨胀物	近于透明	羧甲基(CMC)+有机膨胀物具有随应力的施加可不断产生气体的与实际天然气地质背景相类似的重要特征。

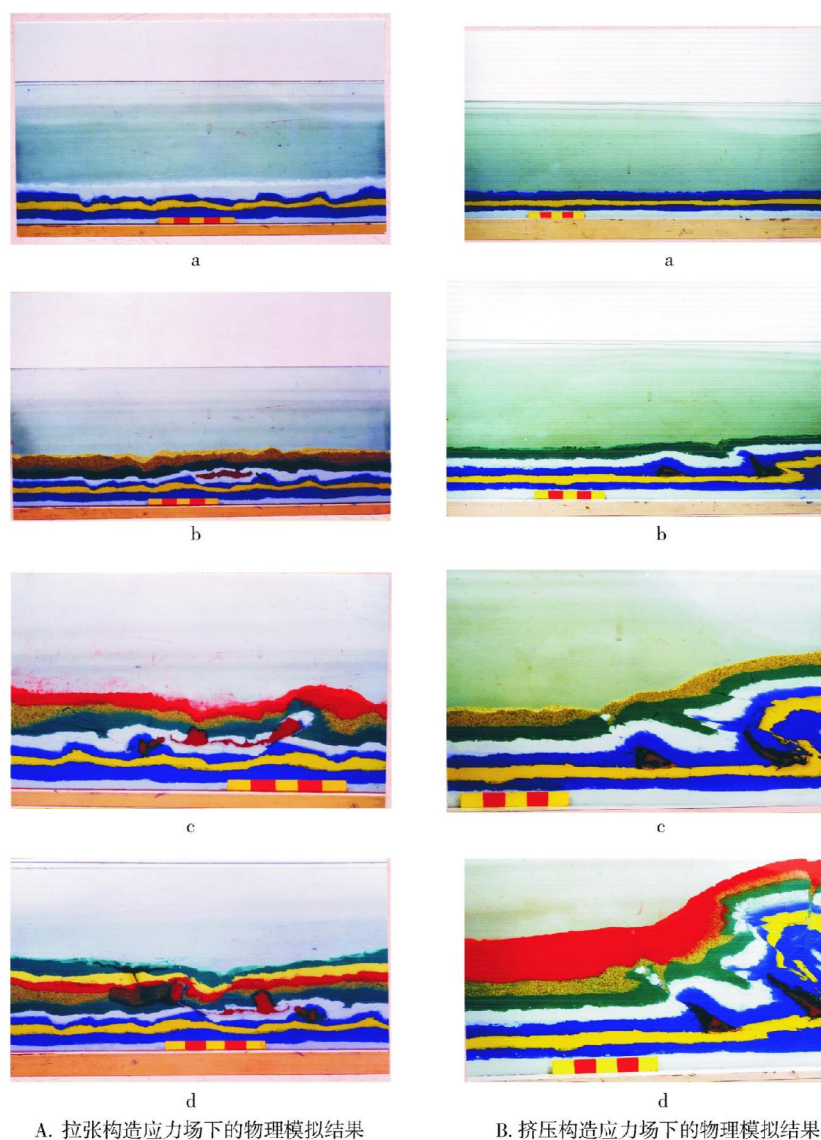


图 1 不同构造应力作用下构造变形与油气混合物运聚的物理模拟实验成果图

Fig. 1 Results of physical simulation experiments of tectonic deformation and migration of oil & gas mixture under various tectonic stresses

2.2.2 挤压应力场

初始实验模型设计及实验过程: 驱动力为横向挤压应力场, 初始实验模型由 4 层沉积盖层组成, 5~7 层是在尔后的地质构造运动中陆续沉积的, 其余同张应力场模型。

实验结果: 第一阶段, 在压缩应力场作用下, 在沉积层抗应力薄弱带形成早期局部小背斜和逆断层系。第二阶段, 随着上覆层系的不断加厚及压缩应力场持续的作用, 可清楚地观察到构造变形与“油气”运移之间的叠置关系, 构造体系中的断层和裂隙是“油气”运移的主要通道。“油气”由模型下部层向上部、由边缘向有利成藏区运移。第三阶段, 随着沉积层缩短率明显加大, 背斜隆起幅度和逆断层逆冲值增加, 可清楚地观察到在应

力作用下, 产生有逆断层逆冲前缘的张性裂隙 (应力低值区), 随着模型底层 (应力高值区) “烃类”的不断运移 (中间夹带有“天然气”), 烃类沿岩层与断层运移。第四阶段, 进一步的压缩应力和上覆层的不断作用, 逆断层带的后缘逐渐停止活动而前缘活动增强, 在前缘逆断层的上部形成低值应力集中区, “油气”沿断层和裂隙通道不断从断层下部向上部、由高值应力区向低值应力区运移, 最终在其上部构造应力低值区“成藏”, 油气运移轨迹十分清楚。同时, 随着构造体系的演化, “油气”聚集量不断增加, 在压缩应力场作用下, 构造变形与烃类运移叠置发生, 可以有力证实构造应力场对构造变形和烃类运移具有共同的驱动效应, 但是在构造形成和演化的初期阶段, 烃类的运

移滞后于构造体系的形成。

综上两个物理模拟实验表明,油气运聚滞后于沉积岩石变形,尽管油气运移方向有一主要运移或流动趋势,但是不同时期、不同层段、不同区域、不同点的油气运聚方向各有差异,特别是断层的端点、拐点、交汇部位,油气运移往往改变方向。同时,构造应力场引起的沉积岩石变形导致的若干个能量汇聚或耗散中心,为石油和天然气的运移和聚集提供了有利的构造物理场条件。其中,拉张应力场作用下有利于油气向多个运聚中心运移,而挤压应力场作用下则更有利于向相对单一运聚中心运聚。构造应力场作用下产生的沉积物非均匀分布的非均衡效应和构造应力场强弱应力分布区产生的驱动作用,对油气的运聚方向和成藏区域起到直接控制作用。破裂和断层为油气的运移提供了有利通道;断层与断层之间往往形成低值稳定应力区,油气运移轨迹有沿破裂面和断层向上运聚和从凹陷中心向周边运聚的趋势。

3 实例

准噶尔盆地位于新疆北部,是海西运动后期,在南北向挤压应力场作用下发生发展的挤压盆地。盆地内部可以划分石炭—二叠系、侏罗系和第三系 3 套含油气系统^[27]。石油地质条件综合分析认为,印支、燕山和喜山期为 3 次重要的油气成藏期^[28],考虑到研究区经受的这 3 次构造运动的强度和范围,认为印支和喜山运动对盆地内部的作用最强,从而导致印支和喜山成藏期中构造应力对油气运聚的作用最大;而燕山期由于盆地内部特别是盆地腹部未遭受强烈的挤压,其构造应力对油气运聚的直接控制作用较小。因此,我们主要探讨印支和喜山期的古构造应力场与油气运聚的关系。由于印支期的古构造准确恢复的难度较大,在印支期古构造应力场恢复中采用了有限元二维应力场数值模拟方法。喜山期构造应力场恢复采用了更为准确的有限元三维应力场数值模拟方法^[29, 30]。

3.1 印支期

印支期,准噶尔盆地大部分地区表现为北东—

边界几何形状等条件的影响,局部地区派生出北西—南东向挤压应力场,导致该期盆地东部北东向断裂的发育。从最大主应力取值大小上看,印支期盆地北部和西部所受挤压应力较大,明显大于盆地东部和南缘。

从印支期构造应力场与油气运移方向来看,油气的运移方向基本平行最大主应力梯度值的方向;油气运移从高值应力区向低值应力区运移;已探明的油气藏主要分布在主应力低值区、中低值区以及应力等值线密集区的旁侧(图 2)。只有部分油气运移方向例外,不平行最大主应力梯度值的方向。由此说明印支期构造应力场对准噶尔盆地油气藏的形成和分布具有重要的控制作用。在油气运移过程中,尽管直接影响油气运移的驱动力是多种因素综合作用的结果,但构造应力是油气运聚的主导动力。

3.2 喜山期

本期构造应力强烈的作用区主要分布在盆地的南缘,而盆地的腹部和北部广大地区所受的构造应力很弱,盆地的构造应力值具有南高北低的基本特征(图 3)。根据油气由高应力区向低应力区运移的基本规律,该期油气主要的运聚方向存在由南向北运移的总趋势。在油气运移过程中,如遇到合适的圈闭或局部的构造应力低值区,油气即可能在这些有利的地区聚集成藏。这里必须强调指出的是,盆地南缘高应力值应力场的背景中存在多个局部的构造应力低值区,对于油气的聚集极为有利。特别是对侏罗系含油气系统来说,由于其生烃凹陷位于盆地南缘,喜山期又是该系统大量油气生成的成熟期。构造应力的强烈驱动与大量油气生成、运移相配套,使得盆地南缘局部构造应力低值区的圈闭具有近水楼台先得月的优势,有利于对该时期的油气起到捕集作用。

准噶尔盆地侏罗系与其以上地层流体势的分布具有一定的相似性,存在有由下向上、由南而北流体势值由大变小的变化规律,流体势高值区基本分布在盆地南部的油(气)源区,生成的油气以向上、向北运移为主要导向(图 4)。在呼图壁、车排子地区(独山子)、马桥和白家海等流体势低值

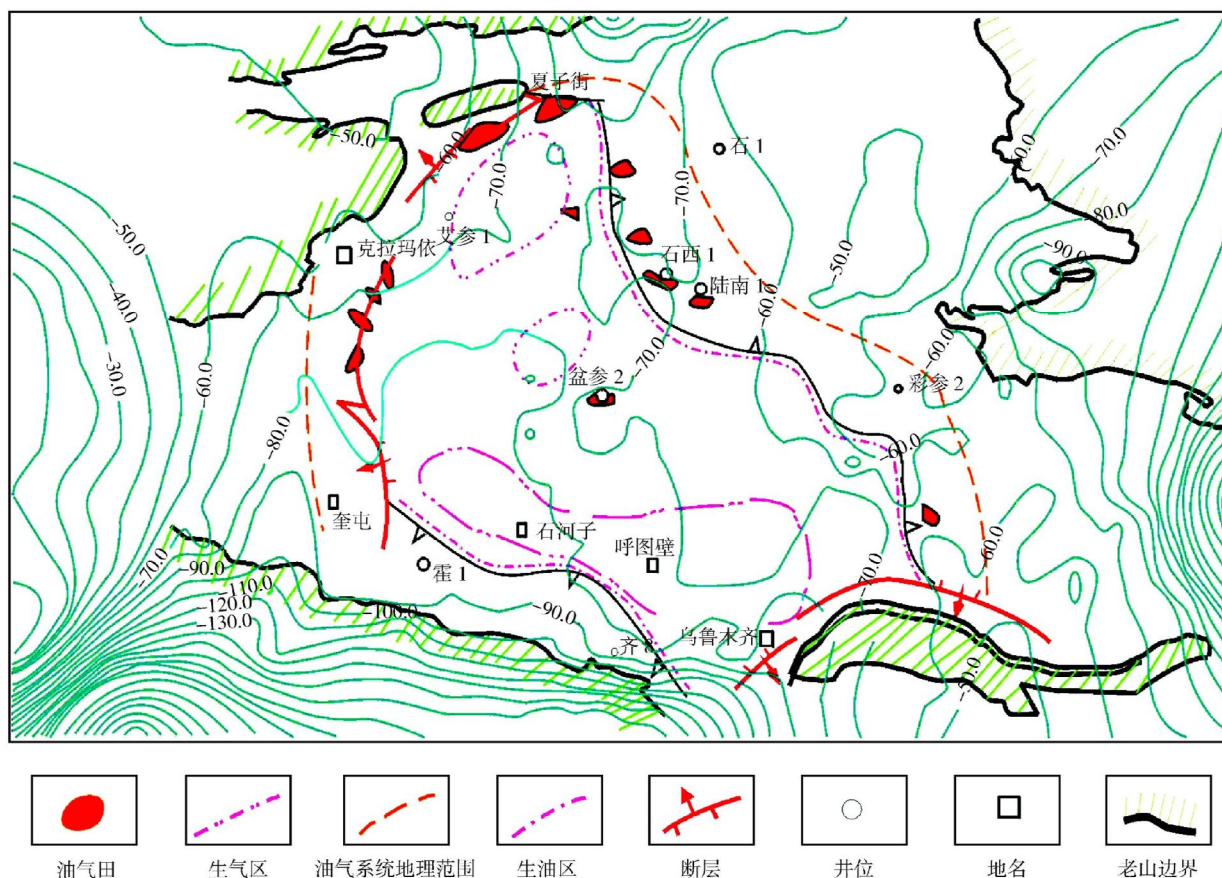


图 2 准噶尔盆地印支期主应力与二叠系油气系统关系图

Fig. 2 Diagram showing relationship between the major stress in Indosinian and the Permian petroleum system in Junggar basin

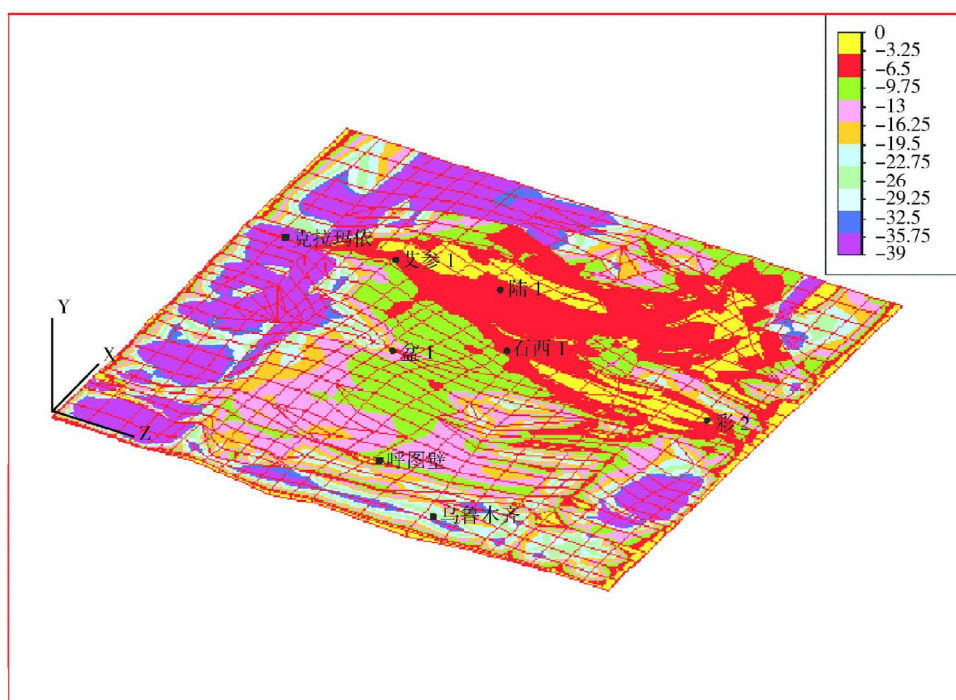
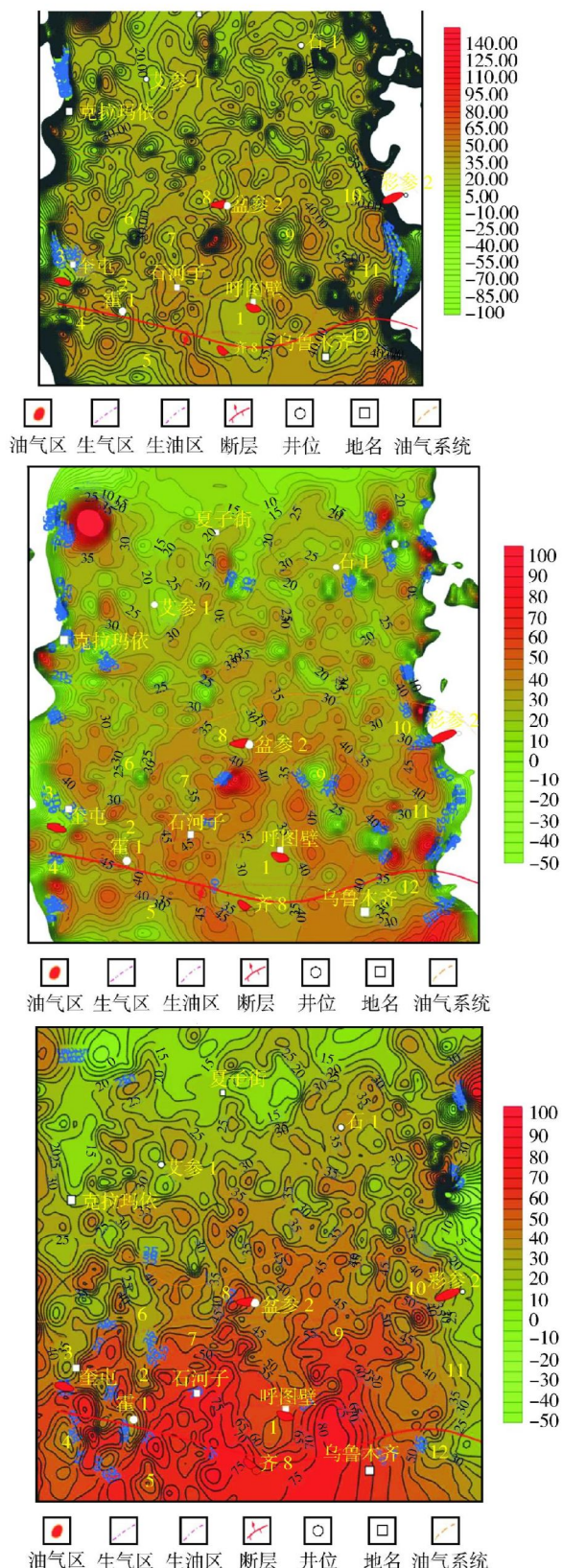


图 3 噶尔盆地喜山期侏罗系最大主应力空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of the Jurassic largest principal stress field during Himalayan movement in Junggar basin



1-呼图壁地区; 2-安集海地区; 3-车排子地区; 4-托斯台地区;
5-达子庙鼻状构造地区; 6-中拐南区; 7-石河子北区; 8-马桥地区;
9-阜北地区; 10-白家海地区; 11-阜东地区; 12-乌鲁木齐地区

图 4 准噶尔盆地喜山期不同层系构造应力作用引起的流体势与侏罗系油气系统关系图

Fig. 4 Jurassic petroleum system vs fluid potential resulting from tectonic stresses in different series of strata during Himalayan period in Junggar basin

区; 另外, 石河子、安集海、阜北和中拐南等地区表现为高应力值背景上的局部相对低势区, 尽管它们表现为不同层系中的局部低值中心有所迁移, 只要有圈闭条件也可成为较有利的油气聚集区。

参 考 文 献

- 李明诚. 石油与天然气运移 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994 190~ 791
Li Mingcheng Oil and natural gas migration [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 1994 190~ 791
- 陶一川. 石油地质流体力学分析基础 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993
Tao Yichuan Hydrodynamic analytical basis of petroleum geology [M]. Wuhan China University of Geoscience Press, 1993
- Perrodon A. Petroleum systems models and applications [J]. Journal of Petroleum Geology, 1992, 15(3): 319~ 326
- 孙楠, 谢鸿森, 郭捷. 构造应力与油气藏生成及分布 [J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 100~ 104
Sun Qiang, Xie Hongsen, Guo Jie Tectonic stress and oil & gas pool formation and distribution [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(2): 100~ 104
- 李明诚. 油气运移研究的现状与进展 [J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(2): 1~ 13
Li Mingcheng Present state of hydrocarbons migration research and its development [J]. Petroleum Exploration & Development, 1994, 21(2): 1~ 13
- Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions [J]. AAPG Bull, 1953, 37: 1954~ 2026
- Rouchet J D. Stress field, a key to oil migration [J]. AAPG Bull, 1981, 65(1): 74~ 85
- England W A. The movement of petroleum fluids in the subsurface [J]. Journal of the Geological Society, 1987, 144: 327~ 347
- Bredehoeft J D, Wesley J B, Fouch T D. Simulations of the origin of fluid pressure, fracture generation, and the movement of fluids in the Uinta basin, Utah [J]. AAPG Bull, 1994, 78(11): 1279~ 1747
- Yassir N A, Zewer A. Stress regimes in the Gulf coast offshore Louisiana: data from well-bore breakout analysis [J]. AAPG Bull, 1997, 81(2), 293~ 307
- Yassir N A, Bell J S. Relationships between pore pressure, stress, and present-day geodynamics in the Scotian shelf offshore eastern Canada [J]. AAPG Bull, 1994, 78(12): 1863~ 1880
- 张厚福, 方朝亮. 石油地质学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999 199~ 215
Zhang Houfu, Fang Zhaoliang Petroleum geology [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 1999 199~ 215
- 肖树方, 杨淑碧. 岩体力学 [M]. 北京: 地质出版社, 1987
Xiao Shufang, Yang Shubi Rock mechanics [M]. Beijing Geological Publishing House, 1987
- 王仁, 丁中一, 殷有泉. 固体力学基础 [M]. 北京: 地质出版

- 社, 1979 181~ 190
- Wang Ren Ding Zhongyi Yin Youquan Basis of solid mechanics [M]. Beijing Geological Publishing House, 1979 181~ 190
- 15 沈淑敏. 构造应力驱动与油气运移 [M]. 北京: 地震出版社, 1998 35~ 68
Shen Shumin Petroleum migration and tectonic stress drive [M]. Beijing Seismologic Press, 1998 35~ 68
 - 16 童亨茂. 应力对流体压力、油气运移作用的几种模式 [J]. 石油大学学报, 1999, 23(2): 107~ 115
Tong Hengmao The way and model of stress effect on hydrocarbon expulsion [J]. Journal of China University of Petroleum, 1999, 22(3): 107~ 115
 - 17 万天丰. 构造应力场研究的最新进展 [J]. 地学前缘, 1993, 2(1~ 2): 226~ 235
Wan Tianfeng The progress of the research on structural stress field [J]. Earth Science Frontiers, 1993, 2(1~ 2): 226~ 235
 - 18 陈庆宣. 岩石力学与构造应力场分析 [M]. 北京: 地质出版社, 1998 1~ 241
Chen Qingxuan Rock mechanics and tectonic stress field analysis [M]. Beijing Geological Publishing House, 1998 1~ 241
 - 19 王东坡, 薛林福, 刘立. 沉积盆地的地球动力学 [J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 181~ 185
Wang Dongpo Xue Linfu Liu Li Geodynamics of sedimentary basin [J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(3): 181~ 185
 - 20 赵重远. 石油地质学发展: 反思和展望 [J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(1): 8~ 14
Zhao Chongyuan Developments in petroleum geology: review and look ahead [J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(1): 8~ 14
 - 21 Allen P A, Allen J R. Basin analysis principles and application [M]. Oxford London: Blackwell Scientific Publications, 1990 464~ 478
 - 22 陈子光. 岩石力学性质与构造应力场 [M]. 北京: 地质出版社, 1986 58~ 84
Chen Ziguang Rock mechanical property and tectonic stress field [M]. Beijing Geological Publishing House, 1986 58~ 84
 - 23 王平. 含油气盆地构造力学原理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1993 34~ 50
Wang Ping Mechanics of structures in petroliferous basins [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 1993 34~ 50
 - 24 李志明. 地应力与油气勘探开发 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997
Li Zhiming Terrestrial stress and petroleum exploration and development [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 1997
 - 25 单家曾. 构造模拟实验在石油地质学中的应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996
Shan Jiazeng Application of structural simulating test in petroleum geology [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 1996
 - 26 宋岩, 王毅, 王振亮. 天然气运聚动力学与气藏形成 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002
Song Yan Wang Yi Wang Zhenliang Dynamics of natural gas migration and accumulation and formation of gas reservoirs [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 2002
 - 27 宋岩, 王振亮, 王毅. 准噶尔盆地天然气成藏条件 [M]. 北京: 科学出版社, 2000
Song Yan Wang Zhenliang Wang Yi Reservoir conditions of natural gas in Junggar basin [M]. Beijing Science Press, 2000
 - 28 宋岩. 准噶尔盆地天然气聚集区带地质特征 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1995
Song Yan Geologic characteristics of natural gas plays in Junggar basin [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 1995
 - 29 杨伟利, 王毅, 李亚辉. 准噶尔盆地燕山运动期构造应力场模拟 [J]. 新疆石油地质, 2003, 24(2): 124~ 127
Yang Weili Wang Yi Li Yahui Modeling of Yanshanian tectonic stress field in Junggar basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(2): 124~ 127
 - 30 张允真. 弹性力学及其有限元法 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983 10~ 35
Zhang Yunzhen Elastic mechanics and its finite-element method [M]. Beijing China Railway Press, 1983 10~ 35

(编辑 李树森)

《石油与天然气地质》杂志影响因子大幅上升

据中国科学技术信息研究所万方数据股份有限公司期刊上网组编制的《中国期刊引证报告》(2004 年)资料, 我院《石油与天然气地质》杂志的影响因子从 2003 年的 0.489 上升到 1.544, 在石油天然气工业类中学科排名列第 1 位 (2003 年列第 4 位), 总被引频次达 1 292 次 (2003 年为 509 次)。

(李 军 供稿)