

文章编号: 0253-9985(2005)05-0674-06

柴达木盆地应力场特征与油气运聚关系

张明利¹, 金之钧¹, 万天丰², 汤良杰³, 李京昌³, 曾联波³

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

3 中国石油大学, 北京 102249)

摘要: 柴达木盆地早侏罗世以来经历了喜马拉雅运动晚期(中更新世末)、喜马拉雅运动中期(上油砂山期末)、燕山运动晚期(白垩纪末)和燕山运动早期(中侏罗世末)4次主要的构造运动。通过声发射法测得相应的最大主应力值分别为 35.6~41.4 MPa、54.8~62.8 MPa、73.8 MPa 和 58.3 MPa。现今最大主压应力有效值为 15.6~112.3 MPa。第三系油气主要成藏期古应力场的最大主压应力有效值为 54.8~62.8 MPa。通过柴西地区主要成藏期应力场数值模拟和典型油气藏解剖, 对柴西地区北西西断裂封闭史进行了分析, 发现中新世晚期北西西向逆断裂对油气运移聚集具有双重性, 断裂活动期主要起运移通道作用, 而断裂静止期则相对封闭, 主要起封堵油气的作用, 使油气在断层上下盘都可以聚集成藏; 油气主要在剪切应力值中等区域聚集成藏。

关键词: 数值模拟; 油气运移; 断层封闭性; 应力场; 柴达木盆地

中图分类号: TE112.1

文献标识码: A

A discussion on relationship between tectonic stress field and migration and accumulation of hydrocarbons in Qaidam basin

Zhang Mingli¹, Jin Zhijun¹, Wan Tianfeng², Tang Liangjie³, Li Jingchang³, Zeng Lianbo³

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

2 China University of Geosciences, Beijing; 3 China University of Petroleum, Beijing)

Abstract Qaidam basin has experienced four major tectonic movements since Early Jurassic, including late Himalayan stage (end of Middle Pleistocene), middle Himalayan stage (end of upper Youshashanian), late Yanshanian stage (end of Cretaceous) and early Yanshanian stage (end of middle Jurassic). The maximum principal stress values during the 4 major stages measured with acoustic emission (AE) method are 35.6~41.4 MPa, 54.8~62.8 MPa, 73.8 MPa and 58.3 MPa respectively. The current effective value of principal compressive stress is in the range of 15.6~112.3 MPa. The effective value of principal compressive stress during the main reservoiring stages of Tertiary oil and gas is in the range of 54.8~62.8 MPa. The sealing history of the NWW fault in western Qaidam basin is studied through simulating the stress fields during the major reservoiring stages and analyzing the typical oil and gas reservoirs in this area. It is found that the NWW reverse fault had dual effects on hydrocarbon migration and accumulation in late Miocene. It acted as hydrocarbon migration pathway during the active stage, and acted as seal during the ceasing stage, making hydrocarbons to accumulate both in the hanging wall and footwall of the fault. Hydrocarbons have accumulated mainly in the areas with moderate shearing stress.

Key words Qaidam basin; stress field; numerical simulation; hydrocarbon migration; fault sealing ability

柴达木盆地中生代经历了 3 个成盆和改造旋回, 即早燕山期裂陷盆地发育阶段、晚燕山期的

挤压改造阶段、早第三纪—晚第三纪中期的挤压走滑抬升阶段和晚第三纪末至第四纪的强烈挤压

基金项目: 中国石油天然气集团公司“九·五”油气勘探科技项目(970208-02)

第一作者简介: 张明利, 男, 42 岁, 高级工程师(博士后), 盆地构造分析与油气地质

收稿日期: 2005-06-18

改造萎缩阶段^[1]。

柴达木盆地地处欧亚大陆南缘, 中、新生代构造应力场的形成、发展和演化与欧亚大陆南缘一系列板块碰撞事件密切相关, 它们的相互作用造就了本区独特的构造应力场演化历史。在中、新生代发展演化过程中, 构造应力方向随着盆地发展演化曾发生主应力方向的转换。这种转换反映了区域动力学机制或动力边界应力条件的变化^[1]。根据柴达木盆地不同时期断裂特征、沉积特征、褶皱构造组合等综合分析, 认为柴达木中、新生代盆地演化受到早—中侏罗世南北向伸展、晚侏罗世—白垩纪近南北—北北西向挤压、早第三纪—上新世晚期南北向挤压背景下的局部向东伸展、上新世晚期—第四纪北北东向挤压等不同阶段应力场的控制。

柴达木盆地西部地区第三系主要发育路乐河组 (E_{1+2})、下干柴沟组下段 (E_3^1)、下干柴沟组上段 (E_3^2)、上干柴沟组 (N_1)、下油砂山组 (N_2^1) 和上油砂山组 (N_2^2) 6 套有效烃源岩。其中下干柴沟组上段 (E_3^2) 的生油层为最好。典型油气藏分析表明, 盆地油气成藏于 N_1 末和 N_2 中晚期。多次构造形成期中以 N_2^3 末的一期为主要构造定型期, 对油气藏的形成具有决定性作用。有一定古构造背景, 储集体相对发育, 近油源的断层相伴生的构造是目前盆地油气勘探的主要目标。

1 古应力场特征

含油气盆地古应力大小的确定是目前应力场

表 1 柴达木盆地声发射实验记忆的历史应力分期统计表
Table 1 Statistics of memorial historical stress by stages in Qaidam basin measured by using AE method

样品层位	井号	试样数量 / 块	实测各点经历的古构造运动期次 (不含现今应力)	各时代岩石记忆构造运动最大主应力值 / MPa
上干柴沟组	赛深 1 井	3	2	66.6
	黄 2 井	5		
	南 8 井	12		
下干柴沟组	赛深 1 井	6	2	62.1, 45.1
	黄 2 井	3		
	狮 23	10		
	南 1 井	3		
路乐河组	狮 23	6	2	64.3, 35.6
	深 81 井	4		
犬牙沟组	深 81 井	2	3	62.8, 42.6, 19.2
大煤沟组	冷科 1 井	3	4	67.2, 48.6
				73.8, 33.2

研究的一个难点问题^[2~3], 声发射法 (AE 法) 测量古今应力是油田应力场研究工作的一项新技术^[2~7]。前人未在柴达木盆地开展过此方面的研究。AE 法的原理是基于声发射活动中的凯瑟 (Kaiser) 效应, 它是指材料受到过一次或多次加载—卸载过程后, 若再对其进行加载时, 一旦超过先存的最大主压应力值的位置, 则声发射活动显著加强, 出现显著声发射率计数的转折点。这一转折点称为凯瑟点 (K 点)。K 点与岩石试样先存最大主压应力值相对应^[5]。作者对柴达木盆地 57 件钻井岩心试样进行了声发射法古应力测量, 测试的层位主要有中—下侏罗统、白垩系、古新统一始新统、渐新统和中新统, 分布地区主要是柴达木盆地的冷湖构造带、南八仙和黄石构造带 (表 1)。

57 个声发射古应力值测试数据的统计结果表明: 上干柴沟组、下干柴沟组和路乐河组记忆了 2 期历史应力; 犬牙沟组记忆了 3 期历史应力; 大煤沟组记忆了 4 期历史应力。由此确定喜马拉雅晚期 (中更新世末) 最大主应力有效值为 35.6~41.4 MPa, 喜马拉雅中期 (上油砂山期末) 为 54.8~62.8 MPa, 燕山晚期 (白垩纪末) 为 73.8 MPa, 燕山早期 (中侏罗世末) 为 58.3 MPa, 现今最大主压应力有效值为 15.6~112.3 MPa (表 2)。古应力值测试结果表明中侏罗世末、白垩纪末和晚第三纪晚期可能都存在比较强烈的构造作用, 这与区域构造变形反映的结果相一致。

表 2 柴达木盆地现今最大主压应力值统计表
Table 2 Statistics of current maximum principal compressive stress values in Qaidam basin

井号	样品时代	埋深 / m	岩性	现今最大主压应力 / MPa
冷科 1	J_{1-2}	3 753	泥岩	58.3
赛芯 1	E_3	1 636~1 642	粉细砂岩	25.7
赛芯 1	N_1	1 160~1 168	细砂岩	21.6
深 81	K	3 054~3 058	中细砂岩	29.2
深 81	E_{1+2}	2 776~2 784	中细砂岩	21.2
黄 2	E_3	2 088~2 092	粉砂岩	31.8
黄 2	N_1	900~904	粉砂质泥岩	25.2
仙 6	N_1	1 508~1 517	粉砂岩	15.6
狮 23	E_3	5 509~5 516	泥灰岩	112.3
狮 23	E_{1+2}	3 988~3 995	钙质泥岩	104.0
南 1 井	E_3	1 508~1 517	深灰色泥岩	88.8
南 8 井	N_1	1 508~1 517	浅灰色泥岩	65.5

另外,根据盆地石油地质综合研究成果^[8],第三系油气藏的主要成藏期为晚第三纪上油砂山期末至狮子沟期初,根据声发射古应力测试结果可以确定盆地西部第三系油气主要成藏期最大主应力有效值为 54.8~62.8MPa。这一结果为盆地构造应力场数值模拟提供了重要的应力场方面基础资料。现今最大主压应力值的确定也对油气田开发具有重要意义。

2 构造应力场模拟

关于柴达木盆地构造应力场模拟,王金荣、黄汉纯等分别对整个柴达木盆地进行过有限元数值模拟,他们采用的均是弹性程序和试凑法,并且仅划分了 100~300 个有限单元^[9-10]。另外,黄汉纯等还对整个盆地进行了光弹模拟^[10]。为了探讨柴达木盆地构造应力场与油气的关系,本文选择了柴达木盆地西部第三系含油气区作为研究区,依据实测的应力场数据,采用万天丰教授和陈明佑教授编制的有限元弹塑性平面问题增量法源程序对研究区油气主要运移期(晚第三纪晚期)构造应力场进行了模拟。该程序的最大优点是可以模拟岩石的弹塑性变形^[11]。

柴西南地区应力场模拟的地质模型采用与之相对应的主要勘探目的层的构造图来建立。模拟区南界为昆北断裂,西北界为阿尔金断裂,东、西分别为人为边界,选取了区内 28 条主要断层(图 1)。鉴于柴西地区地质体形态复杂,全部采用了三角形单元,并尽量接近等边三角形。由于断层处岩石强度较低,将断层带单元单独划分出来,并赋予特殊的岩石物性。由于断层带宽度一般很窄,单元划分时采用窄条状三角形单元(图 2)。本次模拟将柴西地区基本模型划分了 628 个三角形单元,343 个节点(图 2)。根据简化的地质体特征将模型分为 3 种材料:第一种是以第三系砂岩、砂质泥岩为代表;第二种是小断层;第三种是大断层。然后分别给 628 个单元赋予不同的材料特性。反映模型岩石特性的主要物性参数是弹性模量与泊松比。这些参数的合理选择对于模拟弹塑性变形过程影响极大,柴西地区第三系以砂岩、砂质泥岩为主,因此,弹性模量取 19 000MPa。在设计外荷作用力时,首先考虑了研究区内黄石构造带的黄 2 井声发射法实测的晚第三纪最大有效主压应力($\sigma_{\text{估}} = 66.6\text{MPa}$),同时也参考了邻区实测的应力值。应力作用方向是根据该构造时期形

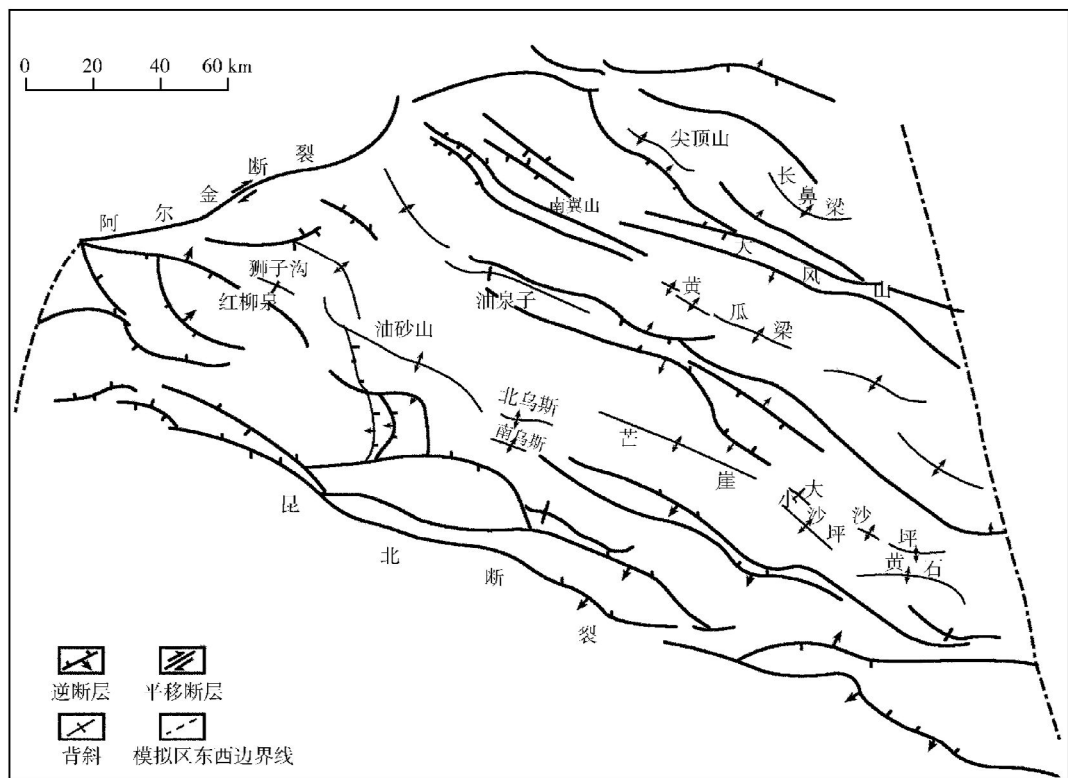


图 1 柴西地区构造图

Fig. 1 Structural map in western Qaidam basin

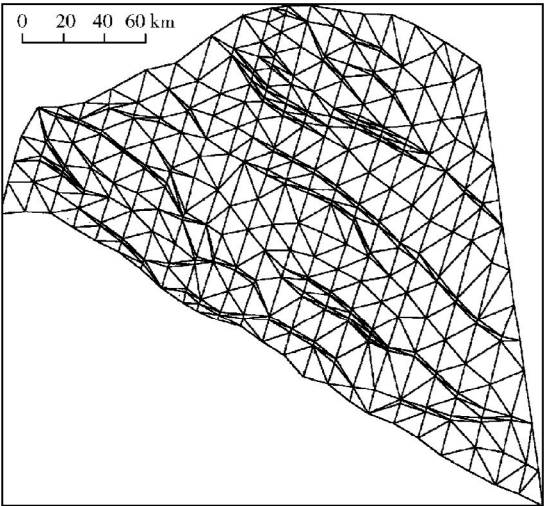


图 2 柴西地区有限元模拟地质模型

Fig. 2 Geological model of finite element simulation in western Qaidam basin

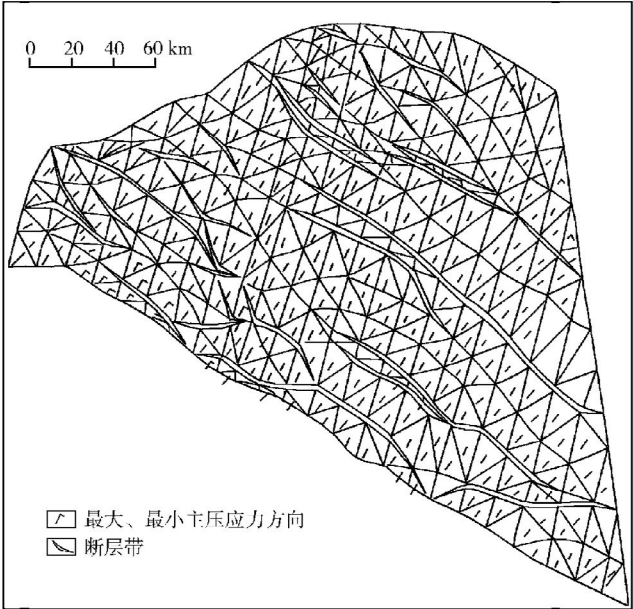


图 3 柴西地区晚第三纪最大主压应力方位图

Fig. 3 Orientation of maximum principal compressive stress in Late Tertiary in western Qaidam basin

成的褶皱构造来确定的。模拟时的初始边界应力值为: 北北东-南南西向水平压应力为 65~70MPa 北西西-南东东向水平压应力为 20~30MPa。按程序设计要求, 为保证数学模拟按照弹塑性变形来计算, 本次模拟采用 3 次增量的方法, 第一次增量选择为总外荷力的 75%, 第二次为 20%, 第三次为 5%, 并给出 3 套平衡的外荷作用力系与 3 套岩石物性参数(表 3)。这种增量变化的选择大体上符合脆性材料塑性变形过程的特点。

从柴西地区构造应力场数值模拟结果看(图 3), 该区晚第三纪构造应力场的最大主压应力方

表 3 柴西地区构造应力场数值模拟物性参数表

Table 3 Poropem param eters achieved from numerical simulation of tectonic stress field in western Qaidam basin

模拟 序次	第三系砂岩、 砂质泥岩		小断层中的 断层泥		大断层中的 断层泥	
	<i>E</i> /MPa	μ	<i>E</i> /MPa	μ	<i>E</i> /MPa	μ
一	19 000	0.17	12 000	0.30	8 000	0.40
二	16 000	0.20	10 000	0.33	7 000	0.41
三	13 000	0.23	8 000	0.35	6 000	0.42

注: 表中 *E* 为弹性模量; μ 为泊松比, 无量纲

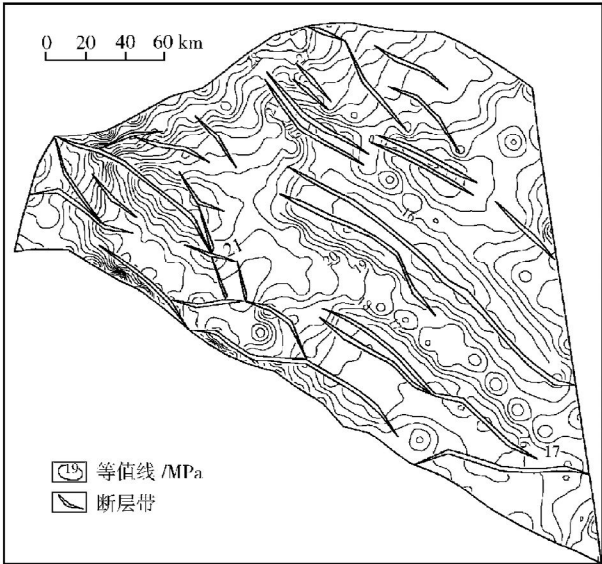


图 4 柴西地区晚第三纪最大剪切应力等值线图

Fig. 4 Contour map of maximum shear stress in Late Tertiary in western Qaidam basin

向为北北东-南南西向, 其方位主要分布在 30°~40°, 平均为 35°左右, 而最小主压应力方向主要为 300°~310°, 与最大主压应力方向近垂直分布。主应力方位的分布受断层控制, 尤其在阿尔金断裂带和昆北断裂带两条边界断裂附近, 应力方向变化明显, 一般在 10°以上, 而在其他内部断层附近, 应力方向变化一般小于 10°。应力方向的变化反映了在区域构造应力场作用下, 断层活动对其局部构造应力的扰动效应, 使其局部构造应力方位发生不同程度的改变。

从最大剪切应力等值线图看(图 4), 该区最

大剪切应力等值线呈北西向展布。受区内北西向断层控制,最大剪切应力的高值区主要分布在阿尔金断裂带和昆北断裂带附近,其最大剪应力值在 22MPa 以上,尤其是两断裂的交汇部位剪切应力集中,最大剪切应力值超过 32MPa。区内北西向断裂带附近,由于岩石较为破碎,其最大剪切应力值较低,一般小于 14MPa。

3 构造应力场与油气的关系

3.1 构造应力场控制油气的分布

柴达木盆地中、新生代构造应力场演化控制了盆地中隆起与坳陷的形成与分布,决定了盆地中的 3 套主力烃源岩的分布与演化,也间接控制了含油气区的分布。应力场控制下生油气坳陷中心的转移,控制着油气藏分布的转移。早、中侏罗世南北向伸展应力场作用下的裂陷演化阶段控制的早、中侏罗世的生油深坳陷以及中、下侏罗统灰黑色泥岩、碳质泥岩烃源岩主要分布于柴达木盆地北缘和阿尔金山前;早第三纪—上新世晚期南北向挤压背景下的局部向东伸展应力场作用下的走滑、逃逸阶段伴随盆地西部的整体坳陷,控制的第三系始新统下干柴沟组高含钙、高含盐的泥岩—碳酸岩烃源岩主要分布于盆地西部的茫崖坳陷和一里坪坳陷;上新世晚期—第四纪北北东向挤

压应力场作用下的挤压推覆阶段,由于盆地南部的昆仑山造山带向盆地仰冲、推覆,使盆地东部地区强烈沉降,决定了第四系下更新统暗色泥岩、碳质泥岩、页岩等生物气源岩主要分布于盆地东部的三湖坳陷和霍布逊坳陷;另外,晚侏罗世—白垩纪近南北—北北西向挤压、上新世晚期—第四纪北北东向挤压阶段的应力场控制了盆地内二级构造带中断裂与圈闭构造的形成与演化,也控制了油气聚集带的分布。

构造应力场在油气形成的不同时期对油气有不同的控制作用。油气运聚前区域应力场形成的大型坳陷控制生油区;油气运聚成藏期区域应力场决定油气聚集带;油气成藏期后的应力场影响油气的再调整和再聚集。现今应力场直接影响油气的最后一次运移、聚集和分布,并影响到油气田的开发。

3.2 对油气运移聚集的影响

柴西地区构造应力场的模拟结果表明:已知油气藏主要分布在剪切应力值为 18~21MPa 的区域,既不在构造应力值最大的部位,也不在构造应力值最小的地方,属于应力中等的部位(图 5)。因为构造应力值最大的部位,岩石强烈破碎,断裂活动剧烈,往往构成油气运移的优势通道,很少能聚集成有价值的油气藏;构造应力最小的部位,岩

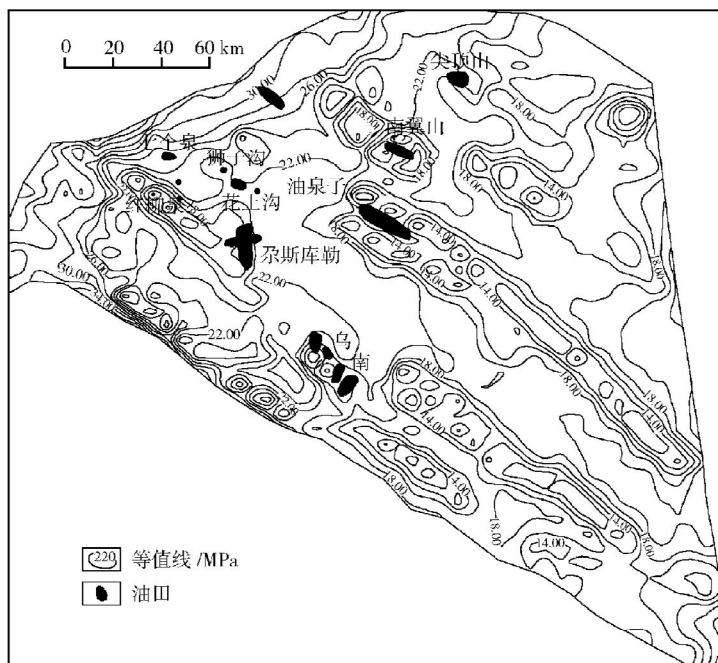


图 5 柴西地区最大剪切应力等值线与油气田分布图

Fig. 5 Contour map of maximum shear stress and distribution of oil and gas fields in western Qaidam basin

石破碎程度最低,渗透率低,既不利于流体运移,也不利于聚集;在构造应力中等的部位,在适当的构造应力作用下,岩石具有一定程度的破碎,同时又不过分的破碎,当其上部有盖层存在时有利于油气的运移与聚集,往往容易形成一定规模油气藏。

3.3 影响断裂封闭性

柴西地区主要成藏期应力场数值模拟结果表明^[12],晚第三纪晚期柴西地区构造应力场的最大主压应力方位为北北东-南南西向,其方位主要分布在 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$,平均为 35° 左右,与北西西向断裂走向近垂直分布(图3)。主应力方位的分布在断层带附近尽管受到断层影响而发生偏转,但偏转变化一般小于 10° ,晚第三纪晚期呈高角度的北西西向逆断裂在静止期表现为相对封闭,主要起封堵油气作用,使油气在断层上下盘都可以聚集成藏;柴西地区已发现油气田的分布特点表明,油气分布与断裂密切相关,已知油气田主要沿北西西向断裂带分布。在柴西地区第三系油气储层中发现了沸腾包裹体^[1],表明柴达木盆地在断裂输导作用下油气有过快速运移与充注成藏过程。这可能主要对应于断裂活动阶段。综上所述,柴西地区断裂对油气运移聚集具有双重性,断裂活动期主要起运移通道作用,而断裂静止期主要起封堵油气的作用。

参 考 文 献

- 1 金之钧,张明利,汤良杰,等.柴达木中新生代盆地演化及其控油气作用[J].石油与天然气地质,2004,25(6):603~608
Jin Zhijun, Zhang Mingli, Tang Liangjie, et al. Evolution of Mesozoic-Cenozoic Qaidam basin and its control on oil and gas[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(6): 603~608
- 2 万天丰.构造应力场研究的新进展[J].地学前缘,1995,2(2):226~235
Wan Tianfeng. The new research development of tectonic stress field[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(2): 226~235
- 3 张明利,万天丰.含油气盆地构造应力场研究新进展[J].地球科学进展,1998,13(1):38~43
Zhang Mingli, Wan Tianfeng. The new research development of tectonic stress field in oil and gas basin[J]. Advance in Earth Sciences, 1998, 13(1): 38~43
- 4 Tan Chengxuan, Jin Zhijun, Zhang Mingli, et al. An approach to present-day three-dimensional(3D) stress field application in hydrocarbon migration and accumulation from the Zhangqiang depression, Liaohe field, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(9): 983~994
- 5 孙宝珊,丁原辰.声发射法测量古今应力在油田中的应用[J].地质力学学报,1996,2(2):1~17
Sun Baoshan, Ding Yuanchen. Estimating history stress values by using the AE method and application in oil and gas field[J]. Journal of Geomechanics, 1996, 2(2): 1~17
- 6 谭成轩,王连捷,孙宝珊,等.油气盆地三维构造应力场数值模拟方法[J].地质力学学报,1997,3(1):71~80
Tan Chengxuan, Wang Lianjie, Sun Baoshan, et al. An approach to numerical simulation of 3-D tectonic stress field of the oil-gas-bearing basins[J]. Journal of Geomechanics, 1997, 3(1): 71~80
- 7 王连捷,张利容,袁嘉音,等.地应力与油气运移[J].地质力学学报,1996,2(2):1~10
Wang Lianjie, Zhang Lirong, Yuan Jiayin, et al. Crustal stress and oil and gas migration[J]. Journal of Geomechanics, 1996, 2(2): 1~10
- 8 林腊梅,金强.柴达木盆地北缘和西部主力烃源岩的生烃史[J].石油与天然气地质,2004,25(6):677~681
Lin Lanmei, Jin Qiang. Hydrocarbon generation history of major source rocks in the northern edge and western part of Qaidam basin[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(6): 677~681
- 9 王金荣,彭作林,李益三.柴达木盆地构造应力场及其地质意义[J].兰州大学学报,1991,27(3):120~127
Wang Jinrong, Peng Zuolin, Li Yisan. Tectonic stress field and its geological significance in Qaidam basin[J]. Journal of Lanzhou University, 1991, 27(3): 120~127
- 10 黄汉纯,黄庆华,马寅生.柴达木盆地地质与油气预测——立体地质、三维应力、聚油模式[M].北京:地质出版社,1996
Huang Hanchun, Huang Qinghua, Ma Yisheng. Geology and forecasting of oil and gas in Qaidam basin—spatial geology, 3D stress, oil accumulation mode[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996
- 11 张守仁,万天丰,陈建平.川西坳陷孝泉-新场地区须家河组二-四段构造应力场模拟及裂缝发育区带预测[J].石油与天然气地质,2004,25(1):70~74
Zhang Shouren, Wan Tianfeng, Chen Jianping. Tectonic stress field modeling and fracture prediction in T_3x^{2-4} strata in Xiaquan-Xinchang area, Chuanxi depression[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 70~74
- 12 丁文龙,王燮培,李衍达,等.柴西地区杂斯断陷同生逆断裂构造特征与形成演化[J].石油与天然气地质,2004,25(6):634~638
Ding Wenlong, Wang Xiepei, Li Yanda, et al. Structural features and evolution of contemporaneous reversed faults in Gas faulted depression in western Qaidam basin[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(6): 634~638

(编辑 高岩)