

文章编号: 0253-9985(2004)06-0659-07

柴达木盆地尕斯断陷断层封闭性及其对油气运聚的作用

张春林¹, 高先志^{1,2}, 李潍莲^{2,3}, 马达德⁴

(1. 石油大学资源与信息学院, 北京 102249; 2. 石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249;
3. 中国地质大学能源学院, 北京 100083; 4. 中国石油青海油田勘探开发研究院, 甘肃敦煌 736200)

摘要: 影响断层封闭性的主要因素包括: 断层的活动性、泥岩涂抹系数、断层两盘的岩性对置关系、断面压力与泥地比的关系。将这 4 个主要影响因素作为评价参数, 结合盆地构造演化, 综合研究了柴达木盆地尕斯断陷内断层的垂向、侧向封闭性和封闭史。结果表明, 柴西地区断层的封闭性在时空上存在着较大的差异性, 并在油气运聚过程中起到不同的作用: 当断层作为油气运移通道时, 可以连接源岩和圈闭, 并且控制着油气在垂向上的运聚层位和运聚时期, 如 VII 号、XI 号等断层; 当断层作为遮挡体时, 控制着油气聚集圈闭的形成, 如乌南断层; 断层活动开启还会引起油气藏的破坏和油气的再分配, 如油砂山、南翼山地区的断层。

关键词: 柴达木盆地; 尕斯断陷; 断层封闭性; 断层封闭史; 油气运聚

中图分类号: TE111.2 文献标识码: A

Sealing capacity of faults and its control on hydrocarbon migration and accumulation in Gas fault depression in Qaidam basin

Zhang Chunlin¹, Gao Xianzhi^{1,2}, Li Weilian^{2,3}, Ma Dade⁴

(1. Resources and Information College, University of Petroleum, Beijing; 2. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation, University of Petroleum, Ministry of Education, Beijing; 3. China University of Geosciences, Beijing; 4. Petroleum Exploration and Development Research Institute, Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang, Gansu)

Abstract: The key factors that influence sealing capacity of fault include fault activity, shale smearing factor, lithologic juxtaposition on both sides of fault, and relation between pressure on fault plane and shale-stratum ratio. Taking these four key influential factors as appraisal parameters and integrating with tectonic evolution of the basin, the vertical and lateral sealing capacities and sealing history of the faults in Gas fault depression in Qaidam basin are studied. It is shown that the sealing capacities of faults vary largely in time and space in western Qaidam basin and have played different roles in hydrocarbon migration and accumulation. When acting as migration pathways of hydrocarbon, the faults would interconnect source rocks and traps and controlled the horizons and times of vertical migration and accumulation of hydrocarbons, such as the VII and XI faults. When acting as barrier beds, they would control the formation of traps for hydrocarbon accumulation, such as Wunan fault. Reactivation of faults would destruct oil and gas reservoirs, leading to the redistribution of oil and gas, such as the faults in Youshashan and Nanyishan areas.

Key words: Qaidam basin; Gas fault depression; fault sealing capacities; sealing history of fault; hydrocarbon migration and accumulation

燕山和喜山两大构造运动时期, 受西南印度板块强大的推覆挤压作用, 柴达木盆地尕斯断陷

区内形成了一系列较大的断裂, 其中大部分为同沉积断裂。这些断裂不仅控制了本区的构造框

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技工程项目(970208-02)

第一作者简介: 张春林, 男, 25 岁, 硕士生, 石油地质

收稿日期: 2004-11-26

架,而且控制了沉积、烃源岩演化、油气的运移和圈闭的形成。有些学者^[1,2]曾经对该区的断裂做过部分研究,此次我们在这些学者研究的基础上系统地对该区的断层封闭性进行了分析。

1 断裂分布

尕斯断陷断层比较发育,据初步统计有断层 86 条,其中一、二级断层 21 条,三、四、五级断层 65 条。在这些断层中除跃进二号东、西高点、砂西、尕斯背斜发育正断层外,其余均以逆冲断层为主。这些断层发生早、继承性强。从平面和剖面组合规律看,主要可以分成近北西西向和北北西向(图 1)。其中近北西西向的断层主要有七个泉、红柳泉、阿拉尔、XI号等断层,与盆地西部构造线走向一致,这组断层延伸长、落差大、断穿层位多,对断层两盘的沉积起着明显的控制作用;而像 III号、VII号、狮子沟、绿东和乌南等断层属于近北北西向,这组断层较前一组规模小,多与背斜褶皱同期发育,对构造起切割分块作用,对构造或各块油气水边界起着控制作用。

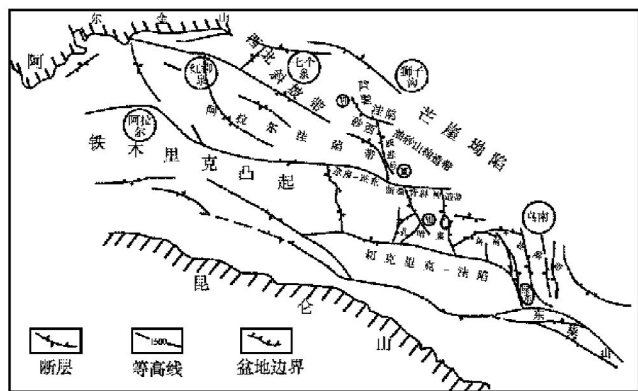


图 1 柴达木盆地尕斯断陷断裂构造纲要图
Fig. 1 Structure outline map of Gas fault depression
in Qaidam basin

2 封闭性评价

2.1 参数

断层的封闭性受多种地质因素控制。目前,很多学者主要进行封闭性的定量评价^[3,4],但仅此是不够的,还必须与定性的方法结合起来综合评价断层封闭性,才能得出较符合实际地质情况的结果。通过对断层封闭性的主要影响因素分析,我们选取断层的活动性、泥岩涂抹系数、断面压力与泥地比、

断层两盘地层的对置关系等 4 个参数作为综合研究断层封闭性的指标^[5~9]。

2.1.1 断层活动性评价

在盆地形成初期,受燕山运动影响,基岩已经破裂,像阿拉尔、红柳泉、XI号、狮子沟等断层已经产生;后来喜山运动 I 幕,盆地又受到来自南西方向的冲撞,不仅使先期断层活动加剧,同时产生了一批新断层,如 III号、VII号、绿东、七个泉、乌南等断层。在以后的沉积过程中,这些断层始终活动,直到最后的喜山运动 II 期。以上发育的断层都经受了第三纪强烈的喜山运动,对油气主要起开启作用。断层是否开启还必须通过确定断移地层的泥地比和泥岩涂抹系数,对断层的封闭性作进一步研究。因为当储层或生油岩附近发育较厚的泥岩层时,泥岩层在断裂作用过程中,可在储层或生油层附近形成与其相接的泥岩剪切带,即使在活动断层中也具有封闭性^[5]。狮子沟、绿东、乌南、XI号等断层在第三纪晚期、第四纪初期已经停止活动,断层封闭性需用其他方法来判断。

2.1.2 泥岩涂抹系数

由于不同地区、不同盆地的岩性组合、岩石成分、压实程度的不同,作为评价断层侧向封闭与否的标准值也不同。这一临界值必须通过分析研究区已知断层的封闭性来确定。

为了确定柴西地区断层侧向封闭与开启的泥岩涂抹系数临界值,选择了 III号和 VII号断层的主体部位作为典型的开启断层,II号和七个泉断层作为典型的封闭断层,依次建立判断柴西地区断层侧向封闭与否的标准。

通过对这 4 条断层两侧目的层段的地层水分析(表 1),可以得出 III号、VII号断层两侧的同层位的地层水都为 CaCl_2 型,并且地层水的矿化度和水密度接近,表明断层两侧地层中的水可以互相沟通,断层处于开启的状态。而 II号和七个泉断层两侧的地层水型完全不同,而且地层水的矿化度和水密度相差较大,表明其处于封闭状态。

根据跃 15、19、66、131 和跃深 1 井、跃东 110 井、七深 4 井、红 18 井等 8 口井统计的被断层断开地层的岩性和断距,建立了判断柴西地区断层侧向封闭性的标准。从图 2 中可以看出封闭性断层的泥岩涂抹系数小于 5,开启的断层泥岩涂抹系数大于 5,因此,我们将泥岩涂抹系数等于 5 作为判断柴西地区断层封闭性的界限。

表1 典型断层目的层段地层水分析

Table 1 Analysis of formation water in the target interval of typical faults

断层名称	井号	井段/m	层位	矿化度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	水密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	水型
III号断层	跃深1	3 431.8~3 437.4	E_3^1	187 612	1.100	CaCl_2
	跃131	3 834.8~3 861.0	E_3^1	186 432	1.095	CaCl_2
VII号断层	跃66	2 208.8~2 217.2	E_3^1	122 916	1.086	CaCl_2
	跃东110	3 075.0~3 078.0	E_3^1	129 518	1.088	CaCl_2
II号断层	跃15	2 764.5~2 770.5	E_3^1	173 113	1.124	CaCl_2
	跃19	2 678.5~2 723.6	E_3^1	110 175	1.077	CaSO_4
七个泉断层	七深4	1 989.3~1 993.4	E_3^2	141 825	1.111	CaSO_4 和 NaHCO_3
	红18	2 012.2~2 016.5	E_3^2	155 470	1.085	CaCl_2

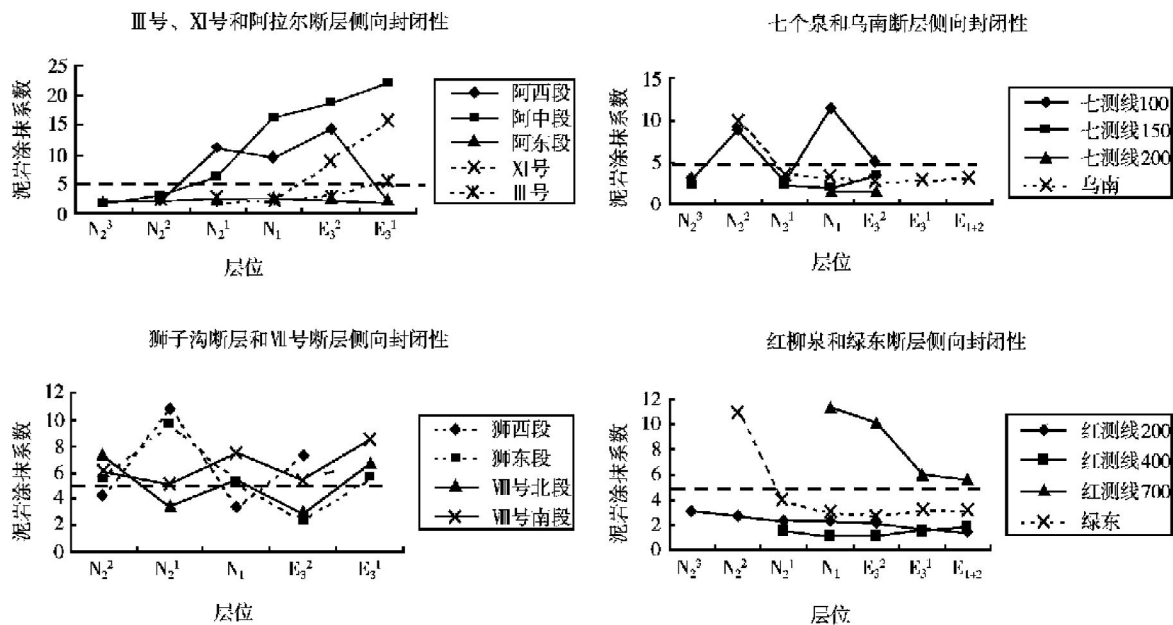


图2 尕斯断陷断层侧向封闭特点

Fig. 2 Lateral sealing properties of faults in Gas fault depression

2.1.3 断面压力和泥地比

通过分析断层的断面压力、断面产状和断裂填充物的性质,认为影响断层垂向封闭性好坏的关键因素是断面的紧闭程度。断面的紧闭程度可用断面所受正压力大小来衡量,其计算公式为

$$P = H(\rho_f - \rho_w) \times 0.009\,876 \cos \theta$$

式中 P 为断面所受的正压力, MPa; H 为断面埋深, m; ρ_f 为上覆地层的平均密度, g/cm^3 ; ρ_w 为地层水密度, g/cm^3 ; θ 为断面倾角, ($^\circ$)。

根据上述公式计算出各断层面的正压力值并结合断穿地层的泥地比值,然后参考吕延防、付广等^[6]断层垂向封闭性评价标准,可以确定阿拉尔、

乌南和绿东断层的垂向封闭性差, III号和 XI号断层的垂向封闭性较好,而红柳泉、七个泉、狮子沟和 VII号断层沿走向不同位置及沿倾向不同深度处的垂向封闭性存在着较大的差异。其中红柳泉断层西段好东段差、七个泉断层西段差东段好、狮子沟断层下部好上部差、VII号断层北段好南段差。

2.1.4 两盘岩性对置关系

由于尕斯断陷受到多期构造运动的影响,所以多数断层一直处于活动状态中。在这里我们只选择在第三纪晚期至今处于非活动状态、同时具有较丰富的地震和钻井资料的 III号和 XI号断层进行岩性对置关系的分析研究。

2.1.4.1 III号断层

III号断层位于阿拉尔断层下盘,为研究区内一条重要的三级断层,平面上呈北北西向展布,断层曾在中新世和上新世早期剧烈活动,使断层在此时期一度出露地表,造成断层上、下两盘相应地层都遭受到不同程度的剥蚀。这也说明该断层在

中新世和上新世早期一直处于开启状态,使深部的油气向上运移至其他圈闭聚集起来或者运移到地表而散失。从表 2 可看出,该断层从下到上出现了多次泥岩对接的现象,断层的顶部被上第三系和第四系所覆盖,所以该断层自晚第三纪以来可能一直处于封闭状态。

表 2 III号和 XI号断层部分层段岩性对置关系

Table 2 Lithologic juxtaposition relationship in some intervals of the faults IIIand XI

III号断层				XI号断层			
深度/m	对接情况	深度/m	对接情况	深度/m	对接情况	深度/m	对接情况
1 464~ 1 475	1	1 749~ 1 761	2	2 002~ 2 012	2	2 182~ 2 209	1
1 475~ 1 484	3	1 761~ 1 773	1	2 012~ 2 018	1	2 209~ 2 234	2
1 484~ 1 488	1	1 773~ 1 803	2	2 018~ 2 023	2	2 234~ 2 247	1
1 488~ 1 559	2	1 803~ 1 847	1	2 023~ 2 030	1	2 247~ 2 255	2
1 559~ 1 568	1	1 847~ 1 882	2	2 030~ 2 043	2	2 255~ 2 262	1
1 568~ 1 598	2	1 882~ 1 1937	1	2 043~ 2 050	1	2 2629~ 2 290	2
1 598~ 1 608	1	1 937~ 1 989	2	2 050~ 2 063	2	2 290~ 2 305	1
1 608~ 1 663	2	1 989~ 1 999	1	2 063~ 2 072	1	2 305~ 2 326	3
1 663~ 1 718	1	1 999~ 2 023	2	2 072~ 2 116	2	2 326~ 2 341	2
1 718~ 1 743	2	2 023~ 2 082	3	2 116~ 2 132	1	2 341~ 2 368	1
1 743~ 1 749	1	2 028~ 2 050	1	2 132~ 2 182	2	2 368~ 2 376	2

注: 1—泥泥对接; 2—砂泥对接; 3—砂砂对接

2.1.4.2 XI号断层

XI号断层是尕斯地区的一条划带断层。断层在上新世早中期发生剧烈运动,造成断层两侧相同地层的厚度存在着很大差异,并且由于这次运动使断层呈开启状态,造成油气向地层浅部运移并保存,断层活动结束于上新世晚期。断层自第四纪以来基本上处于非活动状态,从表 2 断层部分层段岩性对置关系可看出,断层在所研究层段内(上干柴沟组内)有多处泥岩对接的区域,这说明断层在此层段内具有封闭的作用,这与用泥岩涂抹系数的方法评价结果相一致,所以该断层自第四纪以来上部一直处于封闭状态。

2.2 结果

在综合分析上述 4 个参数对断层封闭性作用的基础上,结合前人的研究成果^[5,6]和本区实际情况,得出了本区断层封闭性综合评价结果:①III号和 XI号断层封闭性总体上都不错;②七个泉、红柳泉断层沿走向封闭性表现为西段好东段差;③阿拉尔断层、乌南和绿东断层侧向封闭性好、垂向封闭性差, VII号断层表现为北段好于南段;④狮子沟断层的各层段封闭性表现为较大的差异性。

3 封闭史分析

断层的形成与发展并非是平稳进行的,而是间歇性活动的。无论断层的现今封闭性如何好,地质时期均有过开启的过程。如果断层开启时期与烃源岩生排烃时期相匹配,那么断层将作为油气运移的通道使其运移到上覆地层的圈闭中聚集成藏或者运移到地表而散失。因此,研究断层封闭史也是断层封闭性研究中的一个重要方面。

断层封闭史是指控油断层封闭性的发展演化历史^[10]。为了搞清地质历史时期研究区断层的封闭性,我们通过对构造演化史的恢复,重塑断层在各地史时期的古落差,同时恢复各地史时期地层的泥岩含量。在以上基础上运用泥岩涂抹系数方法,计算各地史时期断层的侧向封闭程度。再根据古埋深、断层倾角来计算古断面压力,研究断层的垂向封闭性,最后进行断层封闭性演化史的综合定量评价。

本次研究我们重点对 VII号、XI号和红柳泉断层进行了封闭史分析(图 3)。研究结果如下。

①VII号断层两侧的封闭史有很大的差异,其

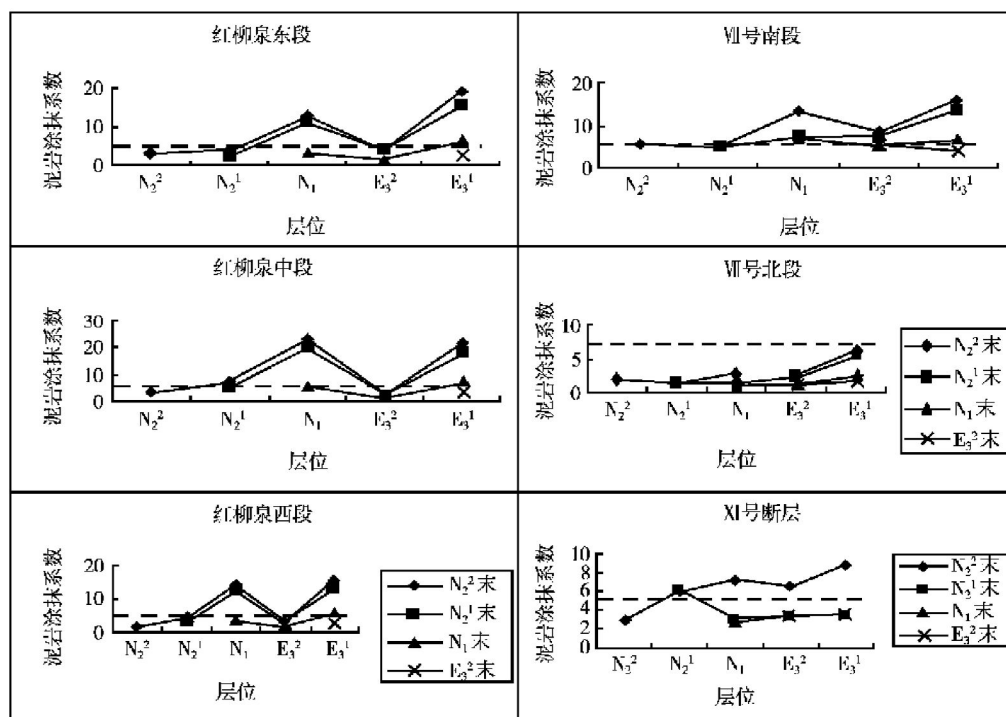


图3 VII号、XI号和红柳泉断层侧向封闭史

Fig. 3 Lateral sealing history of fault VI and XI, as well as Hongliuquan fault

北段的垂、侧向封闭性明显好于南段。这主要是由于断层北段所处位置的泥岩含量比较高, 断层活动使断层面形成了封闭性能较好的泥岩涂抹层, 并且有足够的泥岩填充到断裂带中阻止油气的运移。

②红柳泉断层在不同测点处的垂、侧向封闭性无较大的差异, 其在侧向上表现为间歇性的封闭与开启, 在垂向上断层下部的封闭性要好于上部。

③XI号断层垂向封闭性比较差, 而其侧向封闭性在不同的地质时期以及不同地层都表现出不同的封闭性。

4 与油气运聚关系^[6, 11]

4.1 控制油气的运聚

在垂向上呈开启状态的断层, 它们是油气穿层运移的良好通道。在尕斯断陷内断层作为油气运移的通道, 对油气藏的形成主要起到以下3个作用。

4.1.1 作为运移通道

断层作为油气运移的通道, 主要是通过其内及其附近的裂缝网络系统进行的。它可使纵向上相距较远的源岩与圈闭连接起来, 尤其是穿层系源岩与圈闭连接的桥梁, 是油气在纵向上穿层系长距离运移的重要途径。

砂西构造位于XI号断裂上盘, III号断裂下盘, 整体为一轴向北西西、向西倾伏的断鼻构造。该地区的主要生油层为下干柴沟组上段—上干柴沟组, 主要储集层和盖层为上干柴沟组—下油砂山组, 构成了砂西地区下生上储成油组合, 而作为连接生油层和储集层的主要通道为II、XI号等断层(图4a)。通过对这些断层的封闭史研究, 认为这些断层在地质时期垂向上一直保持着开启状态, 并且该地区的生油岩主要排烃期为下油砂山组(N_2^1)晚期—七个泉组(Q_{1+2})沉积时期, 圈闭形成于下干柴沟组上段(E_3^2)沉积时期、定型于狮子沟组(N_3^1)沉积末期, 因此, 圈闭、烃源岩和运移通道在时空上的配置是十分有利的。

跃东构造位于阿拉尔断裂上盘、XII号断裂下盘, 为两个断层所夹持的、向东倾伏的断鼻构造, 轴向近东西。跃中构造位于阿拉尔断裂下盘、XII号断裂上盘(图4b)。跃中、跃东构造主要储集层为下油砂山组、上干柴沟组、下干柴沟组下段, 生油层为上干柴沟组、下干柴沟组上段, 圈闭主要形成于下干柴沟组—下油砂山组沉积期, 而生油高峰期为下油砂山组沉积晚期—七个泉组沉积时期(表3), 并且断层的封闭史表明此地区的断层在生油高峰期一直处于开启的状态。因此生油岩所生

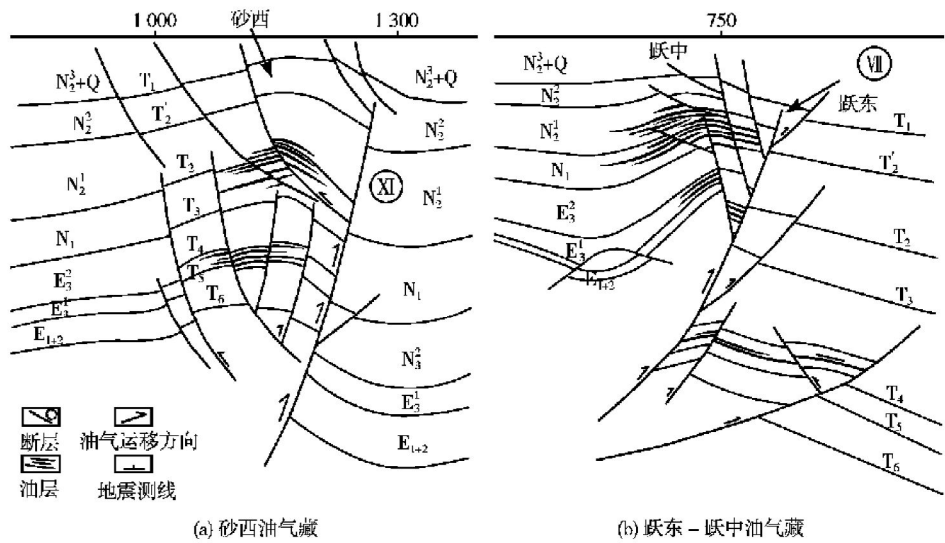


图 4 受断层控制形成的油气藏

Fig. 4 Reservoirs controlled by faults

成的油气可顺 XI号断层往上运移到构造高部。

表 3 跃进地区生油高峰期与圈闭形成期关系

Table 3 Relation between oil generating peak and trap formation in Yuejin region

生油层位	E ₃ ²	N ₁ ¹	N ₁ ²	N ₂ ¹	圈闭形成期
生油高峰期	N ₂ ¹ 晚	N ₂ ² 晚	Q ₁₊₂	/	E ₃ - N ₂ ¹

4.1.2 控制含油层位

断层作为油气运移的通道,它的空间延伸层位控制着油气在垂向上运移的最大距离,在一定程度上也就决定了油气在空间上运聚成藏的范围。尕斯地区断层在垂向上的断开层位主要为T₀—T₆,T₂'—T₆和T₂—T₆等(图4)。这些断层的断穿层位决定了各主要油田的含油层位。通过对尕斯断陷各主要油田含油层位的统计分析,得出其主要含油层为下干柴沟组、上干柴沟组、下油砂山组和上油砂山组。这正与断层断开层位相符合,充分说明了断层在空间上的延伸层位控制着油气在垂向上的运聚层位。

4.1.3 控制运聚时期

断层只有处在活动时期时,方可成为油气大量运移的通道。因此,从这个意义上讲,源岩大量生烃期后的断裂活动时期就应是油气垂向运聚时期。通过对尕斯地区生烃史的研究,认为下干柴

沟组、上干柴沟组烃源岩基本在中新世晚期进入生油门限,第四纪以来局部深洼陷的埋藏深度超过4 200 m 到达生油高峰,大部分还处于生油门限至生油高峰之间。而在此时期内的大规模断裂活动为油气的垂向运移提供了较好的运移通道。在中新世末期和上新世末期,柴达木盆地分别发生了喜马拉雅中期和晚期断裂构造活动。因此,这两个时期正是尕斯地区油气垂向运聚的主要时期。

4.2 控制油气圈闭的形成

当断层活动停止后,由于受断移地层砂泥比值、断层活动泥岩涂抹作用和后期成岩改造作用等影响,断层在侧向上开始具封闭性,成为油气侧向运移的遮挡。按照断层与储集层的组合方式不同可形成以下3种类型:断块圈闭、断鼻圈闭、断层-岩性圈闭。尕斯断陷内的跃进二号东高点跃II265断块的下干柴沟组下段(E₃¹)油藏、砂西的下干柴沟组下段(E₃¹)油藏、乌南油田浅层油藏分别是这3种类型的典型实例(图5)。

4.3 引起油气藏破坏和油气再分配

当断层断至地表时,由于断层的通道、连通作用,使地下深度的高压条件下的油气藏与地表常压环境相连通,巨大的压力差使油气沿断层迅速逸散至地表,造成油气藏的破坏,如果这种作用一直持续下去,就可以完全破坏掉油气藏。如油砂山和干柴沟出露的油砂就是后期断层和后期构造运动对先期油藏的破坏所致(图6a)。

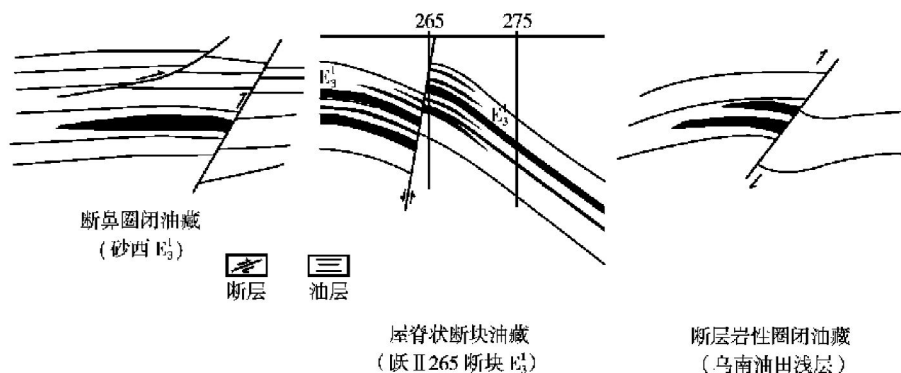


图5 受断层遮挡形成的圈闭油气藏

Fig. 5 Trap reservoirs formed due to the barrier of faults

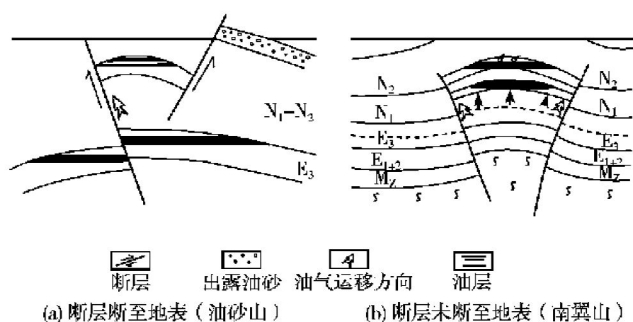


图6 断层活动开启对油气藏破坏与再分布作用

Fig. 6 Destruction and redistribution of reservoirs due to fault reactivation

断层活动开启可以使油气藏与上方储集层圈闭相连通, 油气沿断层向上运移聚集, 如果断层活动开启并未完全破坏原生油气藏, 仅仅使原有油气藏圈闭的容积变小, 这样就会造成溢出点以下的油气沿断裂向上方储集层中运移, 在新的圈闭内聚集成新的油气藏。其结果是原来单一的油气藏分解成若干个油气藏, 以致于油气藏的规模和价值都相应减小, 这种作用称之为“油气的部分再分配”。如果断层活动开启完全破坏了原生油气藏, 油气就会全部向上运移至上方储集层中, 在新圈闭中聚集成新的油气藏, 而原生油气藏消失, 这种作用称之为“油气的完全再分配”。例如南翼山

油田的下干柴沟组上段(E_3^2)原生藏遭到了破坏, 形成了现今的上油砂山组、下油砂山组(N_2)次生气藏(图6b)。

参考文献

- 1 邹华耀, 胡文义. 生长逆断层与油气生成、运移和聚集——以柴达木盆地尕斯断陷为例[J]. 石油与天然气地质, 1993, 14(3): 200~206
- 2 邹华耀, 侯读杰, 张传林, 等. 断层在油气二次运移中的作用研究[J]. 江汉石油学院学报, 1996, 18(1): 7~13
- 3 高先志, 杜玉民, 张宝收. 夏口断层封闭性及对油气成藏的控制作用模式[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 76~78
- 4 童亨茂. 断层开启与封闭的定量分析[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 215~220
- 5 刘志宏, 王文革, 林东成, 等. 塔里木盆地吐木休克断裂带断层封闭性研究[J]. 吉林大学学报, 2003, 33(1): 19~25
- 6 吕延防, 付广, 张云峰, 等. 断层封闭性研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002
- 7 吕延防, 李国会, 王跃文, 等. 断层封闭性的定量研究方法[J]. 石油学报, 1996, 17(3): 39~45
- 8 Smith D A. Theoretical considerations of sealing and nonsealing faults[J]. AAPG Bull, 1966, 50(2): 363~374
- 9 Smith D A. Sealing and nonsealing faults in Louisiana Gulf Coast salt basin[J]. AAPG Bull, 1980, 64(1): 145~172
- 10 赵密福, 信荃麟, 利亚辉, 等. 断层封闭性的研究进展[J]. 新疆石油地质, 2001, 22(3): 258~262
- 11 杨克明, 龚铭. 塔里木盆地断裂的输导和封闭性[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(2): 123~127