

沿不同时期断裂运移的油气被泥岩盖层封闭 所需条件的差异性

——以三肇凹陷青一段和南堡凹陷5号构造东二段为例

张博为¹,付广¹,张居和²,陈雪晴¹,兰晶晶³,胡欣蕾¹

(1. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 中国石油 大庆油田公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712;

3. 中国石油 青海油田分公司 采油一厂, 青海 茫崖 816400)

摘要:为了研究含油气盆地地下生上储式断裂发育区油气分布规律,在不同时期断裂本身特征及其附近压力条件差异性研究的基础上,对油气沿断裂运移特征及其泥岩盖层封闭运移油气所需条件进行了研究。结果表明,泥岩盖层封闭沿不同时期断裂运移油气所需的条件不同。油气沿活动断裂运移的动力既有地层剩余压力,又有油气本身浮力;以伴生和诱导裂缝为输导通道,孔渗性相对较好,阻力相对较小,易于油气穿过泥岩盖层运移;泥岩盖层封闭沿活动断裂运移油气的条件是断裂在泥岩盖层内上下不连接。而油气沿静止期断裂运移的动力仅为油气本身浮力;以断层岩孔隙为输导通道,孔隙性相对较差,阻力相对较大,不易于油气穿过泥岩盖层运移,泥岩盖层封闭沿静止期断裂运移油气所需的条件是断层岩排替压力大于或等于其下储层剩余压力。

关键词:活动期断裂;静止期断裂;封闭条件;泥岩盖层;含油气盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Analysis on the different sealing conditions required by mudstone caprock at different fault evolution stages: A case study on the 1st member of Qingshankou Formation in the Sanzhao Depression and 2nd member of Dongying Formation in the structure No. 5 of the Nanpu Sag

Zhang Bowei¹, Fu Guang¹, Zhang Juhe², Chen Xueqing¹, Lan Jingjing³, Hu Xinlei¹

(1. College of Earth Science, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

2. Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Company Ltd, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163712, China;

3. No. 1 Oil Production Plant, Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Mangya, Qinghai 816400, China)

Abstract: To decipher the hydrocarbon distribution pattern of oil bearing basins with hydrocarbon generating in the deeper formations and then migrating along faults upwards to the shallower reservoirs, we have studied hydrocarbon migration characteristics along faults and mudstone caprock sealing conditions required for accumulating hydrocarbon. Fault characteristics at different evolution stages were studied and corresponding pressure conditions were depicted. The results showed that to seal hydrocarbons migrating along faults, different conditions were required at various stages. The hydrocarbon migration along active faults was driven by both buoyancy and formation overpressure. While the carrier system is associated cracks and induced fractures, the corresponding porosity and permeability were relatively good. In this case, the hydrocarbon migration resistance crossing through the mudstone caprock was lower. Therefore, only when faults above the caprock are disconnected with those below, can the caprock seal the migrating hydrocarbon. In contrast, the hydrocarbon migration along static faults was driven only by buoyancy, while the carrier system was of fault rock pores. In this case, the corresponding porosity is relatively poor with higher migration resistance for the hydrocarbon to break through the mudstone caprock. Therefore, to seal hydrocarbon migrating along faults, the displacement pressure of fault rock should be

收稿日期:2016-11-10;修订日期:2016-12-12。

第一作者简介:张博为(1989—),男,博士研究生,地质资源与地质工程。E-mail:857602305@qq.com。

通讯作者简介:付广(1962—),男,教授,油气藏形成与保存。E-mail:fuguang2008@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41372153)。

equal to or greater than the reservoir overpressure.

Key words: active fault, static fault, closure conditions, mudstone cap rock, oil bearing basin

油气勘探的实践表明,在含油气盆地生储式断裂发育区内,油气在沿断裂由下至上的运移过程中,之所以会在其附近发生侧向分流运移和聚集^[1-2],主要是受到了泥岩盖层的阻挡。泥岩盖层能否封闭沿不同时期断裂运移油气,对在含油气盆地生储式断裂发育区内的油气分布中起到了至关重要的作用。如果泥岩盖层可封闭沿活动期断裂运移的油气,油气则在其下聚集分布;反之油气可在其上下聚集分布。当断裂停止活动后,聚集在泥岩盖层之下的油气仍然会通过断裂穿过泥岩盖层向上散失,如果泥岩盖层能封闭沿静止期断裂运移的油气,那么有利于油气聚集与保存;反之则不利于油气聚集与保存。由此看出,能否正确认识油气沿不同时期断裂运移特征及泥岩盖层封闭油气所需条件的差异性,对于正确认识含油气盆地生储式断裂发育区内油气分布规律至关重要。虽然前人曾从油气运移动力、阻力和输导通道等条件入手,对油气沿活动期断裂和静止期断裂运移机制做过大量研究和探讨^[3-5],但比较二者差异性的研究相对较少^[6-7]。前人对泥岩盖层封闭沿静止期断裂运移油气机制及条件的研究,主要是从盖层内断层岩排替压力与下伏储层岩石排替压力的相对大小,来分析泥岩盖层封闭沿静止期断裂运移油气机制及条件^[8-12]。前人对于泥岩盖层封闭沿活动期断裂运移油气机制及条件研究的相对较少,仅从断裂断距和泥岩盖层相对大小比较,结合其上下油气分布,确定出泥岩盖层封闭沿活动期断裂运移油气所需的最小断接厚度,再通过实际泥岩盖层断接厚度与其封闭沿活动期断裂运移油气所需的最小断接厚度相对大小来研究泥岩盖层是否封闭油气^[13-17]。但对其封闭油气机理缺少阐述,更没有阐述泥岩盖层封闭沿活动期和静止期断裂运移所需条件的差异性,不利于含油气盆地生储式断裂发育区内油气勘探的深入。

1 油气沿不同时期断裂运移特征的差异性

1.1 油气沿断裂运移的动力差异

由于活动期和静止期断裂本身特征及其附近压力状态不同,油气通过活动期和静止期断裂运移受到的动力也就不同。在断裂活动期,由于断裂活动伴生和诱导出大量裂缝使地层被破坏,压力释放降低,使断裂带与地层之间形成压力差。周围地层中的油气在此压

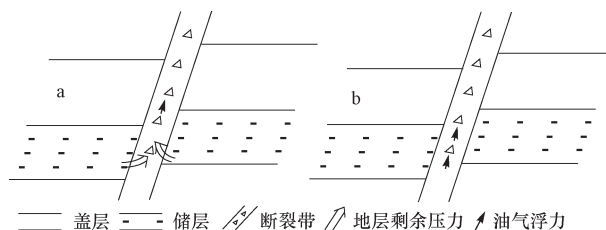


图1 油气沿活动期和静止期断裂运移的动力特征示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dynamic characteristics of hydrocarbon migrating along active and static faults

a. 活动期; b. 静止期

力差的作用下将向断裂带中汇聚运移,进入断裂带中后的油气仍会剩余一定的压力差(图1a),这部分压力差应是油气沿活动断裂运移的主要动力。油气在这种压力差作用下的向上运移被称为“地震泵”作用^[18-20]。除此之外,油气浮力本身也应是油气沿活动断裂运移的动力。由此看出,油气在断裂活动期是在地层剩余压力和浮力共同作用下沿断裂运移,动力相对较强,油气运移不仅速度快,而且数量大。而在断裂静止期,由于断裂伴生和诱导断裂已在上覆沉积载荷重量和区域主压应力作用下紧闭愈合,断裂带与周围地层之间已无地层剩余压力差存在,断裂带中的油气也就无地层剩余压力差,只能依靠本身浮力沿静止期断裂运移(图1b),油气运移动力相对较弱,速度慢,且数量小。

1.2 油气沿断裂运移输导通道的差异性

由于活动期和静止期断裂带内部结构特征不同,油气通过二者的输导通道特征也不同。在断裂活动期,由于断裂发育大量伴生裂缝和诱导裂缝(图2a),沟通了断裂带填充物孔隙储集空间,使其成为油气输导通道。油气不仅可以沿活动断裂的伴生裂缝和诱导裂缝运移,而且还可以沿断裂带填充物孔隙运移,孔渗

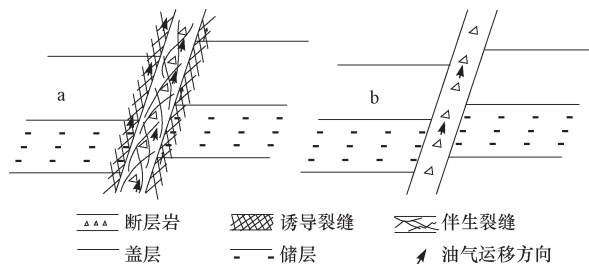


图2 不同时期断裂输导油气通道特征示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing carrier system characteristics for different stages of faults

a. 活动期; b. 静止期

性相对较好,运移速度快,数量大。而在断裂静止期,由于伴生裂缝和诱导裂缝在上覆沉积载荷和区域主压应力的作用下紧闭愈合,已失去输导能力,仅剩已被压实成岩的断层岩孔隙可以输导油气(图2b),孔渗性相对较差,油气运移速度慢,且数量小。

1.3 油气沿断裂运移所受到阻力的差异性

由于活动期断裂和静止期输导油气通道特征不同,油气沿二者运移所受到的阻力特征也不同。在断裂活动期,油气沿断裂运移的输导通道是伴生裂缝和诱导裂缝,因其孔渗性相对较好,毛细管阻力相对较小,易发生沿断裂运移。而在断裂静止期,油气通过断层岩孔隙运移,因此孔渗性相对较差,毛细管阻力相对较大,不易发生沿断裂运移。

2 沿不同时期断裂运移的油气被泥岩盖层封闭所需条件的差异性

2.1 沿活动期断裂运移的油气被泥岩盖层封闭所需的条件

在断裂活动期,由于油气沿断裂运移的动力既有油气本身的浮力,又有地层剩余压力,动力相对较强。又因为其输导通道为伴生裂缝和诱导裂缝,孔渗性相对较好,油气运移所受到的阻力相对较小,所以油气极易沿活动断裂穿过泥岩盖层运移,通常情况下泥岩盖层无法封闭沿活动断裂运移油气。那是不是泥岩盖层就不能封闭沿活动期断裂运移油气呢?显然不是。在特定的地质条件下,泥岩盖层可以封闭沿活动期断裂运移的油气。即活动断裂在泥岩盖层内分段生长,上下不连接,不是一条贯通断裂,其伴生裂缝和诱导裂缝上下也不连接,油气沿断裂运移只能进入到泥岩盖层

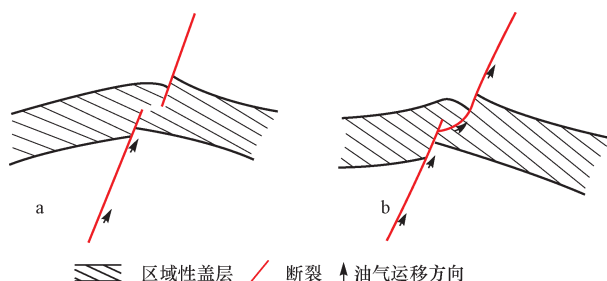


图3 泥岩盖层内断裂发育分布特征

Fig. 3 Fault growth and distribution characteristics in mudstone caprocks

a. 呈上、下两条断裂分布;b. 上、下断裂连接成一条分布

内,而不能穿过泥岩盖层。由于泥岩盖层对油气的封闭能力远远强于伴生裂缝和诱导裂缝对油气的封闭能力,可以阻止油气穿过泥岩盖层运移,反之,泥岩盖层不能封闭沿活动期断裂运移油气(图3)。

三肇凹陷是松辽盆地北部油气主产区,从下至上发育的地层有下白垩统的火石岭组、沙河街组、营城组、登娄库组和泉头组,上白垩统的青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组、古近系和第四系,位于泉头组四段的扶余油层是其下部含油气组合中天然气的主要储层。气源对比结果表明,天然气主要来自下伏沙河街组烃源岩,盖层则为上覆青一段发育的泥岩,属于典型的下生上储式生储盖组合。由三维地震资料解释结果可知,三肇凹陷青一段泥岩盖层内发育不同类型的断裂(图4),其中红色和蓝色两种断裂在天然气成藏期(青山口组—姚家组沉积时期^[21])之后的明水组沉积末期(T_0^6 界面)开启活动。青一段泥岩盖层能否封闭沿这些活动期断裂运移的天然气,对扶余油层天然气的聚集与保存至关重要。通过精细解释断穿青一段泥岩盖层(T_2 界面)内红色和蓝色断裂发现,红色断裂在

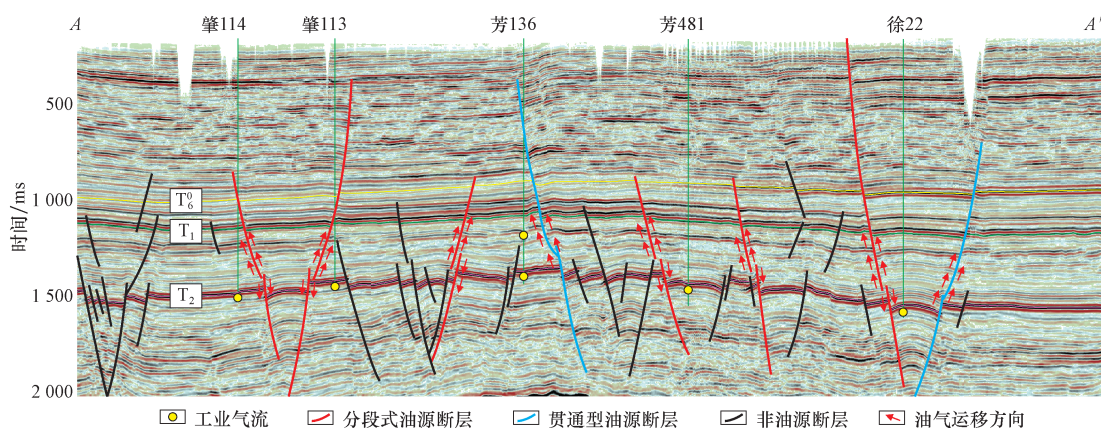


图4 三肇凹陷青一段泥岩盖层内断裂发育特征与天然气分布关系^[22]

Fig. 4 Relationship between fracture development characteristics and natural gas distribution in the mudstone caprocks of the Qingshankou 1st member in the Sanzhao Depression^[22]

青一段泥岩盖层内上、下不连接,为两条断裂,而蓝色断裂在青一段泥岩内上、下连接分布,为一条断裂(图4)。在明水组沉积末期,这些断裂开启活动,下伏扶余油层中已聚集的天然气可以通过蓝色断裂(上、下为一条断裂)穿过青一段泥岩盖层运移,部分天然气运移至上覆葡萄花油层中聚集成藏。该断裂附近在青一段泥岩盖层之下的扶余油层和其上的葡萄花油层均可见到天然气(图4)。而下伏扶余油层中的天然气不能通过红色断裂(上、下不是一条断裂)穿过青一段泥岩盖层运移,天然气只能在其下扶余油层中聚集成藏,该断裂附近只能在下伏扶余油层见到天然气,而上覆葡萄花油层则见不到天然气(图4)。

2.2 沿静止期断裂运移的油气被泥岩盖层封闭所需的条件

在断裂静止期,由于油气沿断裂运移的动力只有油气浮力,输导通道为断层岩孔隙,孔渗性相对较差,只要断层岩排替压力大于或等于油气浮力(或储层剩余压力),泥岩盖层便可以封闭油气;相反,如果断层岩排替压力小于储层剩余压力,那么泥岩盖层则不能封闭油气(图5)。由此看出,断层岩排替压力大于或等于储层剩余压力是泥岩盖层封闭沿静止期断裂运移油气所需的条件。

渤海湾盆地南堡5号构造是主要的含气构造。该构造位于南堡凹陷西部,总体上为一个发育在潜山背景之上的披覆背斜,北东东向,被北东东向断裂复杂化(图6)。从下至上发育的地层有古近系的孔店组、沙河街组、东营组和新近系的馆陶组、明化镇组和第四系。截至目前,已在沙河街组至馆陶组皆发现了天然气,并且以东二段下部天然气居多。气源对比结果表明,天然气主要来自下伏沙三段和沙一段烃源岩,盖层为东二段上部发育的泥岩,属于典型的下生上储式生储盖组合。NP5-2断裂在L7和L8测线处错断了东二段泥岩盖层,在天然气成藏期(东营组沉积末期—馆陶组沉积早期^[23])活动,东二段泥岩盖层之下天然气可以通过活动期NP5-2断裂穿过盖层向上运移,进入到馆三段火山岩盖层之下储层中聚集,这样天然气既可以在东二段泥岩盖层之下聚集分布,又可以在馆三段火山岩盖层之下聚集分布(图6,图7)。馆陶组沉积中期至今,NP5-2断裂停止活动,东二段泥岩盖层之下天然气能否通过静止期NP5-2断裂穿过泥岩盖层向上运移,取决于NP5-2断裂在东二段泥岩盖层内断层岩排替压力与其下伏储层剩余压力的相对大小。由NP5-2断裂在东二段泥岩盖层内的埋深,东二段泥岩盖层压实成岩时间(从其开始沉积至今时间,

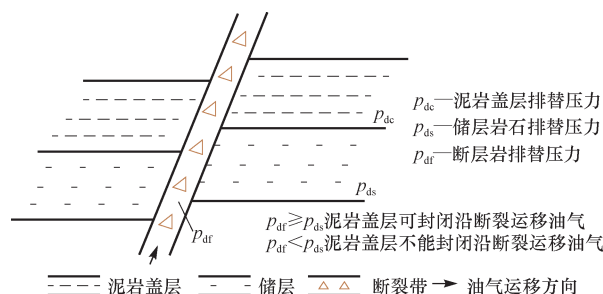


图5 泥岩盖层封闭沿静止期断裂运移油气机理示意图

Fig. 5 sketch map for mechanism of mudstone caprock sealing oil-gas migrating along faults in static periods

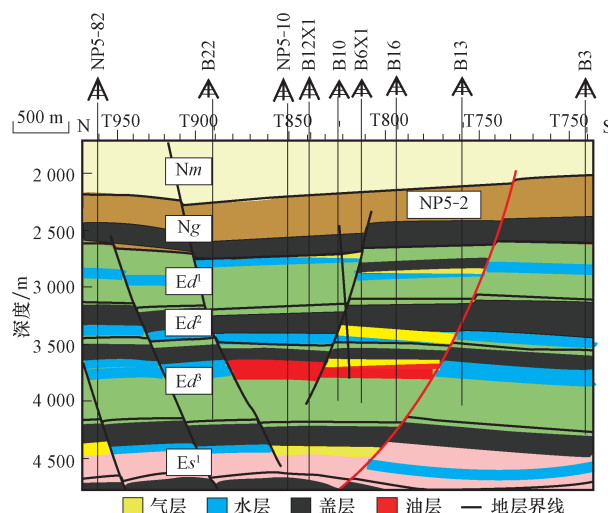


图6 南堡凹陷5号构造过NP5-2断裂的气藏剖面

Fig. 6 Gas reservoir profile across NP5-2 fault in the structure No. 5 of the Nanpu Sag

约为25.3 Ma),根据南堡凹陷围岩(砂泥岩)孔隙度随埋深变化关系(图8),确定出围岩的压实成岩系数(为0.000 47),在假设断层岩与围岩具有相同压实成岩历史的条件下,由公式(1)对断层岩压实成岩时间进行了计算,由公式(2)计算了断层岩的压实成岩埋深(分别为1 438.8 m和1 536.2 m),再由断裂断距和被其错开岩层厚度与泥质含量,由公式(3)便可计算NP5-2断裂在L7和L8测线处东二段泥岩盖层内断层岩的泥质含量(分别为0.632和0.869),最后将计算得到的断层岩压实成岩埋深和泥质含量代入南堡凹陷实测砂泥岩排替压力与成岩埋深和泥质含量关系式[表1和公式(4)]中,便可以计算得到NP5-2断裂在L7和L8测线处断层岩排替压力,分别为0.843 MPa和1.540 MPa。

$$T_f = T_s - T_s e^{-cZ} \quad (1)$$

$$Z_f = Z - \frac{1}{c} \ln \frac{T_s}{T_f} \quad (2)$$

$$R_f = \frac{\sum_{i=1}^n H_i R_i}{L} \quad (3)$$

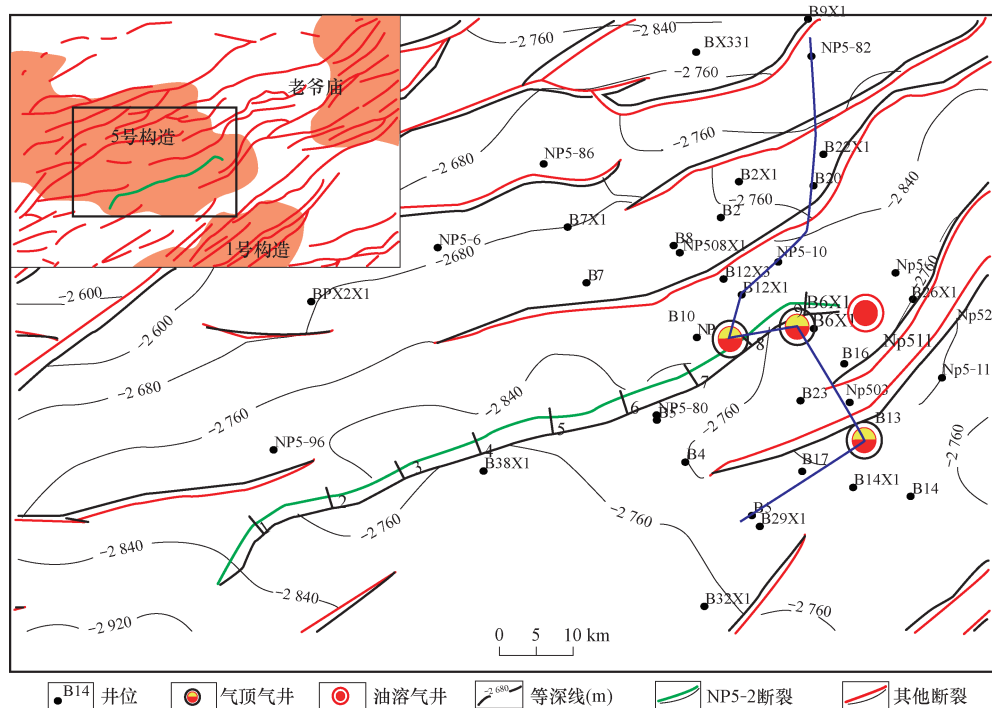


图7 南堡凹陷5号构造NP5-2断裂与天然气分布关系

Fig. 7 Relationship between NP5-2 fault and gas distribution in the structure No. 5 of the Nanpu Sag

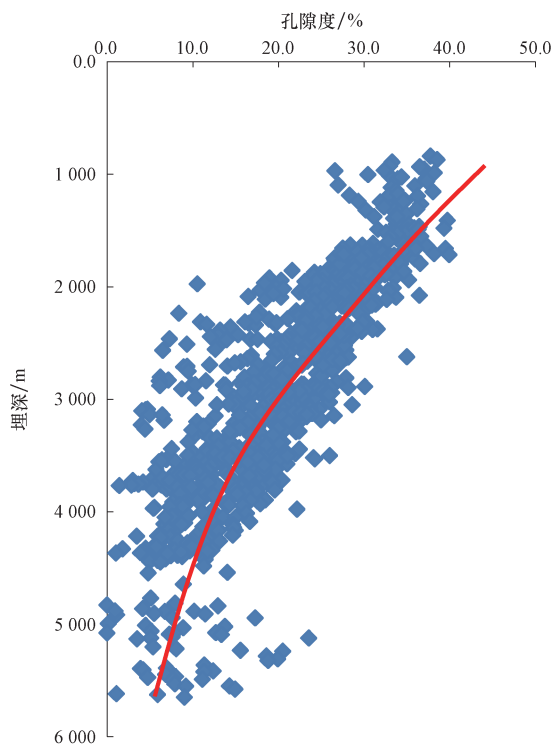


图8 南堡凹陷围岩孔隙度随埋深变化关系

Fig. 8 Relationship between the porosity of surrounding rocks and the corresponding depth in the Nanpu Sag

$$p_r = 0.031 \left(\frac{Z_r R_r}{100} \right)^{1.057} \quad (4)$$

式中: T_f 为断层岩压实成岩时间, Ma; T_s 为东二段泥岩

盖层压实成岩时间, Ma; c 为围岩压实成岩系数; Z_f 为断层岩压实成岩埋深, m; Z 为断层岩埋深, m; R_f 为断层岩泥质含量, 小数; H_i 为被断裂错断第 i 层岩层厚度, m; R_i 为被断裂错断第 i 层岩层泥质含量, 小数; L 为断裂断距, m; n 为被断裂错断的岩层数; p_r 为南堡凹陷砂泥岩排替压力, MPa; Z_r 为南堡凹陷砂泥岩压实成岩埋深, m; R_r 为南堡凹陷砂泥岩泥质含量, 小数。

由 L7 和 L8 测线处东二段泥岩盖层之下储层埋深 (2 459.6 m 和 2 626.1 m) 和实测储层压力系数 (1.220 和 1.057), 根据公式 (5) 便可以计算得到 L7 和 L8 测线处储层的剩余压力为 5.411 MPa 和 1.497 MPa。由此看出 NP5-2 断裂在 L8 测线处东二段泥岩盖层内断层岩排替压力大于其下储层剩余压力, 表明东二段泥岩盖层可以封闭沿静止期 NP5-2 断裂运移天然气, 有利于天然气聚集与保存。而在 L7 测线处 NP5-2 断裂在东二段泥岩盖层内断层岩排替压力小于其下储层剩余压力, 表明东二段泥岩盖层不能封闭沿静止期 NP5-2 断裂运移天然气, 不利于天然气东二段泥岩盖层之下聚集和保存, 这可能是目前在 L7 测线处东二段泥岩盖层之下未找到天然气的根本原因。

$$\Delta p = (k - 1) \rho_w H \quad (5)$$

式中: Δp 为储层剩余压力, MPa; ρ_w 为地层水密度, g/cm³; k 为储层压力系数; H 为储层埋深, m。

表 1 南堡凹陷泥质岩盖层样品排替压力与其埋深和泥质含量关系

Table 1 Relationship between the displacement pressure of mudstone caprock, the corresponding depth and clay content in the Nanpu Sag

井号	深度/m	排替压力/MPa	泥质含量/%	井号	深度/m	排替压力/MPa	泥质含量/%
NP208	2 103. 93	0. 10	23. 34	M28X1 浅	2 813. 30	0. 48	19. 95
M8X1	2 358. 70	0. 04	54. 98	NP4 - 51 浅	2 449. 79	3. 18	54. 60
G3101	2 917. 51	0. 48	7. 22	NP5 - 10	3 320. 00	2. 82	32. 40
M22	2 066. 01	0. 38	13. 38	NP5 - 6	3 447. 90	0. 63	33. 32
B7	3 597. 58	4. 12	38. 70	NP509	3 221. 86	0. 19	5. 14
LP1	3 054. 64	0. 44	5. 18	NP5 - 4	3 339. 90	0. 03	0. 76
L12	3 557. 05	0. 38	16. 94	NP4 - 51 深	3 745. 48	0. 59	29. 77
NP1 - 37	3 045. 50	0. 62	8. 79	M28X1 深	3 268. 60	1. 34	248. 48
L21 - 5	3 110. 31	0. 41	25. 80	NP5 - 6	3 445. 05	0. 83	61. 43
NP1 - 22	2 696. 38	0. 18	25. 20	LP1 深	3 055. 50	0. 56	27. 04
NP401X33	3 304. 40	0. 17	31. 75	NP1	4 244. 60	0. 59	29. 06
B10	3 383. 87	1. 57	47. 71	M38X1	3 318. 70	0. 64	34. 58
M108X1	3 345. 30	3. 11	46. 16	M10	2 678. 70	0. 49	20. 75
M7	1 891. 00	0. 44	22. 83	M11	2 362. 90	0. 72	44. 17
G3104	3 637. 13	0. 30	23. 51	B32X1	1 946. 45	0. 11	2. 66
L21 - 2	1 730. 10	0. 02	7. 81	L15	2 633. 49	0. 24	7. 22
PG1	3 272. 14	2. 03	56. 53	G4	2 663. 90	4. 46	32. 70
G3106	3 899. 50	2. 06	36. 52	LPN1	2 647. 40	0. 26	7. 84
G49	2 448. 60	0. 89	5. 64	G3102	3 424. 50	0. 57	27. 70
G3105	3 589. 36	0. 82	60. 08	G62	4 054. 60	1. 31	229. 28
B6X1	3 093. 50	0. 85	64. 71	NP1 - 4	3 386. 72	4. 57	52. 19
B6	3 196. 30	0. 78	52. 72	M1	3 432. 04	7. 65	65. 83
M30	2 355. 01	0. 80	55. 90	M5	2 768. 36	3. 77	51. 21
M24	2 303. 00	0. 13	3. 19	B5	4 219. 40	4. 25	35. 89
M15	2 807. 90	0. 33	10. 93	B3	2 776. 61	1. 66	63. 80
G23	3 119. 20	0. 52	23. 42	B22X1	4 061. 80	3. 29	58. 04
NP206	2 540. 68	0. 80	56. 41	B13	2 707. 31	0. 87	68. 42
NP2 - 52	3 363. 50	0. 53	24. 37	M17 - 1	2 723. 85	0. 77	51. 49

3 结论

1) 油气沿不同时期断裂运移的特征不同,主要表现在运移动力、输导通道和阻力不同。油气沿活动断裂运移动力既有地层剩余压力,又有油气本身浮力,以伴生裂缝和诱导裂缝为输导通道,孔渗性相对较好,阻力相对较小,易于油气运移;而油气沿静止期断裂运移动力仅为油气本身浮力,以断层岩孔隙为输导通道,孔渗性相对较差,阻力相对较大,不易于油气运移。

2) 泥岩盖层封闭沿不同时期断裂运移油气所需的条件不同,泥岩盖层封闭沿活动期断裂运移油气所需条件是断裂在泥岩盖层内上下不连接,不是油气运移输导通道;而泥岩盖层封闭静止期断裂运移油气所需的条件是断层岩排替压力大于或等于储层剩余压力。

参 考 文 献

[1] 付广,孙同文,吕延防. 南堡凹陷断 - 砂配置侧向输导油气能力

评价方法[J]. 中国矿业大学学报,2014,43(1):79 - 87.

Fu Guang,Sun Tongwen,Lu Yanfang. Nanpu Sag fault evaluation of

sand lateral migration of oil and gas capacity allocation method[J].

Journal of China University of Mining and Technology,2014,43(1):

79 - 87.

[2] 杨华,席胜利,魏新善,等. 苏里格地区天然气勘探潜力分析[J].

天然气工业,2006,26(12):45 - 48 + 195.

Yang Hua,Xi Shenli,Wei Xinshan,et al. Analysis of natural gas ex-

ploration potential in Sulige area[J]. Natural Gas Industry,2006,26

(12):45 - 48 + 195.

[3] 孙同文,付广,吕延防,等. 断裂输导流体的机制及输导形式探讨

[J]. 地质论评,2012,58(6):1081 - 1090.

Sun Tongwen,Fu Guang,Lu Yanfang,et al. Study of mechanism and

conducting form fault transporting fluid [J]. Geological Review,

2012,58(6):1081 - 1090.

[4] 付广,王国民,黄劲松. 断裂静止期有无输导油气能力的判别方

法[J]. 沉积学报,2008,26(5):850 - 856.

Fu Guang,Wang Guomin,Huang Jinsong. There is no fault discrimi-

nant in stationary phase of oil and gas transportation capacity method

[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2008,26(5):850 - 856.

[5] 胡素云,蔚远江,董大忠,等. 准噶尔盆地腹部断裂活动对油气聚

- 集的控制作用[J]. 石油学报, 2006, 27(1): 1-7.
- Hu Suyun, Wei Yuanjiang, Dong Dazhong, et al. Control of oil and gas accumulation in the hinterland of Junggar basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1): 1-7.
- [6] 陈伟, 吴智平, 侯峰, 等. 油气沿断裂走向运移研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(6): 25-30.
- Chen Wei, Wu Zhiping, Hou Feng, et al. Study on the migration of oil and gas along the direction of fault[J]. Journal of China University of Petroleum (natural science edition), 2010, 34(6): 25-30.
- [7] 张明利, 金之钧, 万天丰, 等. 柴达木盆地应力场特征与油气运聚关系[J]. 石油与天然气地质, 2005, 34(5): 674-679.
- Zhang Mingli, Jin Zhijun, Wan Tianfeng, etc. The Qaidam Basin stress field features and hydrocarbon accumulation in poly relationship[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(5): 674-679.
- [8] 付广, 张博为, 历娜, 等. 沿断裂运移油气向两侧砂体发生侧向分流的判别方法[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(2): 211-219.
- Fu Guang, Zhang Bowei, Li Na, et al. Along the fault of oil and gas migration to the both sides of the sand body occurs lateral flow identification method[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2): 211-219.
- [9] 吕延防, 黄劲松, 付广, 等. 砂泥岩薄互层段中断层封闭性的定量研究[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 824-829.
- Lu Yanfang, Huang Jinsong, Fu Guang, et al. Quantitative study on the closure of the fault zone in the thin section of sandstone and mudstone[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 824-829.
- [10] 付广, 王浩然, 胡欣蕾. 断层垂向封闭的断-储排替压力差法及其应用[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 685-691.
- Fu Guang, Wang Haoran, Hu Xinlei. Fault vertical sealing off-the pressure difference method for the pressure difference method and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 685-691.
- [11] 吕延防, 王伟, 胡欣蕾, 等. 断层侧向封闭性定量评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 310-316.
- Lu Yanfang, Wang Wei, Hu Xinlei, et al. Quantitative evaluation method of fault lateral sealing property[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 310-316.
- [12] BERG RR. Capillary pressure in stratigraphic traps[J]. AAPG Bulletin, 1975, 59(6): 939-956.
- [13] 孙永河, 赵博, 董月霞, 等. 南堡凹陷断裂对油气运聚成藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 540-549.
- Sun Yonghe, Zhao Bo, Dong Yuexia, et al. Nanpu fault on the migration and accumulation of oil and gas accumulation of[J]. Oil & Gas geology, 2013, 34(4): 540-549.
- [14] 付广, 王浩然, 胡欣蕾. 断裂带盖层油气封盖断接厚度下限的预测方法及其应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(3): 30-37.
- Fu Guang, Wang Haoran, Hu Xinlei. Fault belt cover oil gas sealing fault prediction method with the minimum thickness and its application[J]. Journal of China University of Petroleum (natural science edition), 2015, 39(3): 30-37.
- [15] 付广, 历娜, 胡明. 盖层断接厚度封气下限及其对天然气分布的控制——以松辽盆地徐家围子断陷为例[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(7): 971-979.
- Fu Guang, Li Na, Hu Ming. Cover layer broken thickness sealing gas limit and distribution of natural gas control in Xujiaweizi fault depression is cases[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(7): 971-979.
- [16] 付晓飞, 贾茹, 王海学, 等. 断层-盖层封闭性定量评价——以塔里木盆地库车坳陷大北-克拉苏构造带为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 300-309.
- Fu Xiaofei, Jia Ru, Wang Haixue, fault-cover seal quantitative evaluation, Kuche depression in Tarim Basin in Dabeicar Su tectonic belt as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(3): 300-309.
- [17] 付广, 杨敬博. 断盖配置对沿断裂运移油气的封闭作用: 以南堡凹陷中浅层为例[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2013, 38(4): 783-791.
- Fu Guang, Yang Jingbo. The fault cover configuration for the closure of hydrocarbon migration along the fault: a shallow layer in the South depression of the depression as an example[J]. Earth Sciences (Journal of China University of Geosciences), 2013, 38(4): 783-791.
- [18] 孙永河, 付晓飞, 吕延防等. 地震泵抽吸作用与油气运聚成藏物理模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(1): 98-104 + 111.
- Sun Yonghe, Fu Xiaofei, Lu Yanfang, et al. Pumping oil and gas migration and accumulation and earthquake simulation of reservoir physics[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(1): 98-104 + 111.
- [19] Sibson R H, Moore J M, Rankin A H. Seismic pumping-a hydrothermal fluid transport mechanism[J]. Journal of Geological Society, 1975, 131(6): 653-659.
- [20] Hooper E C D. Fluid migration along growth fault in compacting sediments[J]. Journal of Petroleum Geology, 1991, 14(2): 161-180.
- [21] 平贵东, 付晓飞, 刘宗堡, 等. 松辽盆地肇州油田层控多边形断层发育特征及在油成藏中的作用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(4): 1353-1365.
- Ping Guidong, Fu Xiaofei, Liu Zongbao, et al. Development characteristics and the role of reservoir control polygon faults in the Zhaozhou oilfield of Songliao Basin[J]. Journal of Central South University (natural science edition), 2015, 46(4): 1353-1365.
- [22] 王海学, 付晓飞, 付广, 等. 三肇凹陷断层垂向分段生长与扶扬油层油源断层的厘定[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2014, 39(11): 1639-1646.
- Wang Haixue, Fu Xiaofei, Fu Guang, et al. Vertical Segmentation growth of fault and oil source fault determination in Fuyang oil layer of Sanzhao Depression[J]. Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(11): 1639-1646.
- [23] 庞雄奇, 霍志鹏, 范泊江, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷源控油气作用及成藏体系评价[J]. 天然气工业, 2014, 34(1): 28-36.
- Pang Xiongqi, Huo Zhipeng, Fan Bojiang, et al. Bohai Bay Basin, Nanpu Sag source control on oil and gas and reservoir evaluation system[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(1): 28-36.