

裂缝性低渗透油藏储层物性的主控因素 及其对产能的影响

——以大情字井油田黑 43 区块为例

陈双艳, 谢俊, 刘一丹, 王金凯, 曾敏敏, 宫延学

(山东科技大学 地质科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 裂缝性低渗透岩性油藏物性复杂, 控制因素多样, 开采难度大, 寻找储层物性的主控因素是该类油藏有效开发的基础。以大情字井油田黑 43 块为例, 在对青山口组青一段储层沉积相、岩性特征、裂缝方向、低幅度构造综合评价基础上, 分析了低渗透裂缝性油藏储集特征, 探讨了储层性质对单井产能的影响。分析认为, 黑 43 区块低渗透储层物性主要受沉积相和裂缝控制, 剩余储量分布与构造幅度、油藏内的油水分异差别、储集层岩性变化密切相关, 为裂缝性低渗透油藏有效开发提供参考。

关键词: 大情字井油田; 低渗透储层; 裂缝储层; 岩性油气藏

中图分类号: TE348

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2014)01-0033-07

Main Controlling Factors of Reservoir Physical Property of Fractured Low Permeability Reservoir and Their Influence on Productivity

——A Case Study of Hei-43 Block, Daqingzijing Oilfield

Chen Shuangyan, Xie Jun, Liu Yidan, Wang Jinkai, Zeng Minmin, Gong Yanxue

(College of Geological Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The reservoir physical property of fractured low permeability-lithologic reservoir is complex, and the prominent controlling factors are difficult to identify. On the base of evaluating the comprehensive evaluation of lithology characteristics, sedimentary facies, fractures directions and low amplitude structures of Qing I member, Qingshankou Formation, this paper analyzed the characteristics of fractured low permeability reservoir and the effect of reservoir properties on single well productivity on the case study of Hei-43 Block of Daqingzijing Oilfield. The results show that sedimentary facies and fractures are the main controlling factors of the physical properties of the low permeability reservoir. In addition, the distribution of remaining reserves is mainly dominated by the low structure amplitude, the reservoir oil-water differentiation and the lithology variations. Thus, this study provided practical significance for the effective exploitation of fractured low permeability reservoir.

Key words: Daqingzijing Oilfield; low permeability reservoir; fractured reservoir; lithologic reservoir

大情字井地区位于松辽盆地南部中央坳陷区长岭凹陷中部, 是近年来松辽盆地南部乃至我国陆上盆地

收稿日期: 2013-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172109); 山东省自然科学基金项目(ZR2011DM009)

作者简介: 陈双艳(1986—), 女, 江苏泗洪人, 硕士研究生, 主要从事油气田开发方面的研究。

E-mail: chenshuangyan0527@163.com

谢俊(1969—), 男, 湖北京山人, 教授, 博士(后), 主要从事油气储层评价、地质建模、油藏数值模拟等方面的教学和科研工作。E-mail: xiejun0532@163.com

最具勘探、开发前景的地区之一^[1-2],具亿吨级储量。黑 43 区块是大情字井油田的典型代表,储层物性表现出相变快、横向连通差、侧向尖灭快、纵向层数多、单层厚度薄、井段跨距大、油水关系复杂、没有统一的油水界面等多因素复合控制的裂缝性低渗透隐蔽油藏特征^[3],直接制约了该油田的勘探开发效果。因此,急需明确裂缝性低渗透油藏储层物性的主控因素及其对产能影响,逐步实现大情字井油田合理、高效开采,并带动国内低品位资源的开采步伐。

1 区域地质概况

大情字井油田由两个次一级的凹陷构成,北部为乾安次凹陷,南部是黑帝庙次凹陷,大情字井油田位于两个次凹陷之间的相对隆起部位,即鞍部。黑 43 区块位于大情字井油田向斜构造的西翼,区内发育一条近南北走向的正断层(图 1),与断层相匹配的低幅度背斜构造是油气聚集成藏的前提,油藏类型为岩性构造油藏^[4]。黑 43 区块砂岩沿物源方向连续性好、垂直物源方向连续性差,侧向相变快、砂岩连通性差。

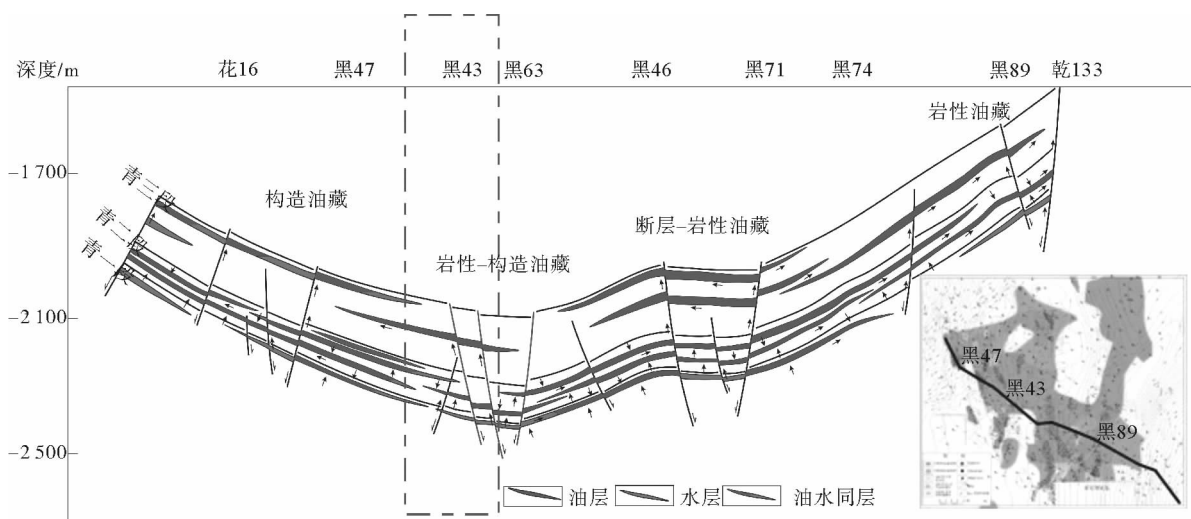


图 1 大情字井油田青山口组花 16-黑 43-黑 46-黑 74-黑 89-乾 133 井油藏剖面图

Fig. 1 Reservoir section of well Hua16-H 43-H 46-H 74-H 89-Qian133 of Qingshankou Formation, Daqingzijing Oilfield

2 影响储层物性的主控因素

2.1 沉积微相对储层物性的影响

沉积环境是影响储层储集性能的基础因素,根据岩心观察和储层岩性实验资料,北部物源和西南物源在此汇合叠加形成了黑 43 区块岩性和物性剧烈变化的三角洲前缘储集砂体,沉积微相包括河口沙坝、前缘沙坝和前缘沙席等^[5-6],砂岩泥质含量较高,储层在层内、层间及平面均具有较强的非均质性^[7-8]。储层孔隙度为 6%~20%,平均 11.88%,渗透率 $0.1 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属低孔特低渗储层。

图 2 为黑 43 区块青一段不同沉积微相的孔渗对比图。可以看出河口沙坝砂体发育较好,物性最好,河口沙坝平均渗透率 $4.58 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均孔隙度 12.51%;前缘沙坝物性次之,平均渗透率 $1.69 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均孔隙度 11.27%;最差的是前缘沙席,平均渗透率 $1.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均孔隙度 9.3%。

2.2 砂体分布对储层物性的控制

青一段整体是在水进条件下沉积形成的,砂体由西南向东北方向延伸,厚度逐渐变薄^[9],但由于期间存在短期的水体振荡,导致各个时期内区块砂体发育的规模和位置均不相同,因此将青一段划分为 4 个砂组 16 个小层。

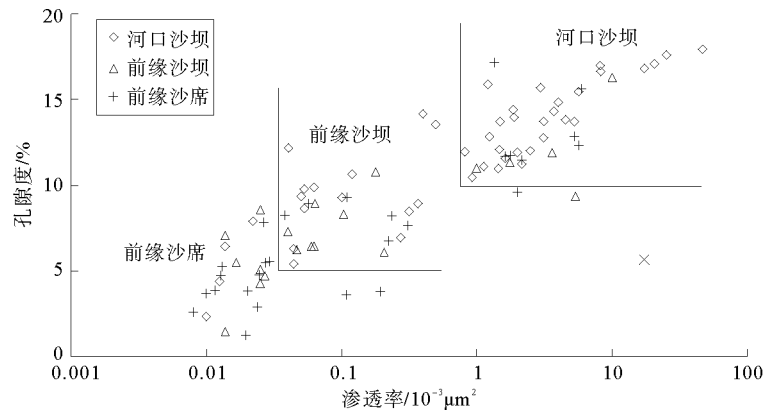


图 2 黑 43 区块青一段沉积微相的孔渗对比图

Fig. 2 Porosity and permeability contrast of sedimentary microfacies of Qing-1 member, Hei-43 Block

青一段 IV 砂组包括 16, 15, 14 和 13 小层。IV 砂组沉积岩岩性主要为泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、碳质粉砂岩和粉砂质泥岩。泥岩含量最高, 达 50.32%; 其次为粉砂岩和泥质粉砂岩, 含量为 13%~14%; 碳质粉砂岩和粉砂质泥岩含量均为 11% 左右; 细砂岩含量较低, 只有 0.9%。储层主要分布在三角洲前缘相带内, 以滨外沙坝与河口沙坝为主要储集体。IV 砂组一般累积厚度 4 m 以上, 黑 43 井最大累积厚度为 23.2 m。储层孔隙度为 8%~12%, 平均孔隙度为 11.32%, 物性较好, 最高可达 18.21%。

青一段 III 砂组包括 12, 11, 10, 9 小层。III 砂组沉积岩岩性主要包括泥岩、粉砂岩、碳质粉砂岩和泥质粉砂岩, 泥岩含量 43.92%, 粉砂岩含量 18.42%, 碳质粉砂岩和泥质粉砂岩含量分别为 15.53% 和 13.44%, 粉砂质泥岩含量偏低, 只有 8.17%, 细砂岩、页岩及介形虫层含量很低, 均小于 0.4%。III 砂组储层沉积厚度 4~11.3 m, 黑 45-10-18 井最大沉积厚度为 11.3 m, 储层孔隙度 7%~12%, 平均孔隙度为 10.84%, 物性较好, 平面变化小。

青一段 II 砂组包括 8, 7, 6, 5, 4 小层。II 砂组中泥岩含量仍然较高, 为 45.48%, 其次为泥质粉砂岩, 含量 17.62%; 粉砂岩和碳质粉砂岩含量相近, 在 15% 左右; 粉砂质泥岩、页岩、细砂岩和生物碎屑砂岩含量较低, 总含量不到 6%。II 砂组储层沉积厚度较大, 一般大于 6 m, 局部较厚, 西南黑 45-10-12 井最大累积厚度达 20.2 m, 大部分地区 7~12 m, 储层孔隙度 7%~12%, 平均孔隙度 10.53%, 平面变化不大, 与储层厚度呈正相关关系。

青一段 I 砂组包括 3, 2, 1 小层。I 砂组泥岩含量最高, 占 70.01%, 粉砂质泥岩含量 7.86%, 泥质粉砂岩、碳质粉砂岩和粉砂岩含量总和仅 20%, 细砂岩、页岩和介形虫层含量仍然很低。I 砂组储层累积厚度多低于 6 m, 东部黑 45-4-16 井附近薄层透镜体储层, 厚度小、分布范围有限。储层孔隙度 6%~10%, 平均孔隙度为 9.3%, 平面变化小, 西南部较厚地区可大于 10% (图 3)。

从 IV 砂组-III 砂组-II 砂组-I 砂组, 可以看出青一段砂岩含量先增大后减少, 泥岩含量则先减少后逐渐增加, 推测其应存在短期的沉积振荡现象, 表现出多期次的短期水进-水退特征。

2.3 裂缝发育对储层物性的影响

黑 43 区块储层裂缝较发育, 地质情况复杂, 属于裂缝型储层。裂缝是导致储层非均质性强的另一重要原因, 不同方向的裂缝发育程度不同, 不同组系的裂缝连通程度也不同, 从而导致不同方向裂缝的渗透率有较大的差异。黑 43 区块的裂缝多为高角度裂缝, 有较好的延展性和穿时性, 它们之间的穿插交织, 在油田储层中形成较发育的裂缝网络系统。在现今地壳应力场状态下, 除近南北走向裂缝组外均有较好的张开度, 是油气储集和运移的主要空间和通道^[10]。在出露的地层中多见垂直或近垂直的裂缝。根据对裂缝面的观察, 主要受地壳水平扭动作用而形成的, 因为裂缝面光滑且具水平擦痕。区块储层属典型的低孔低渗储层, 无论这类储层的天然裂缝是否发育, 实施人工压裂形成的裂缝均利于低渗透油藏的有效开发。

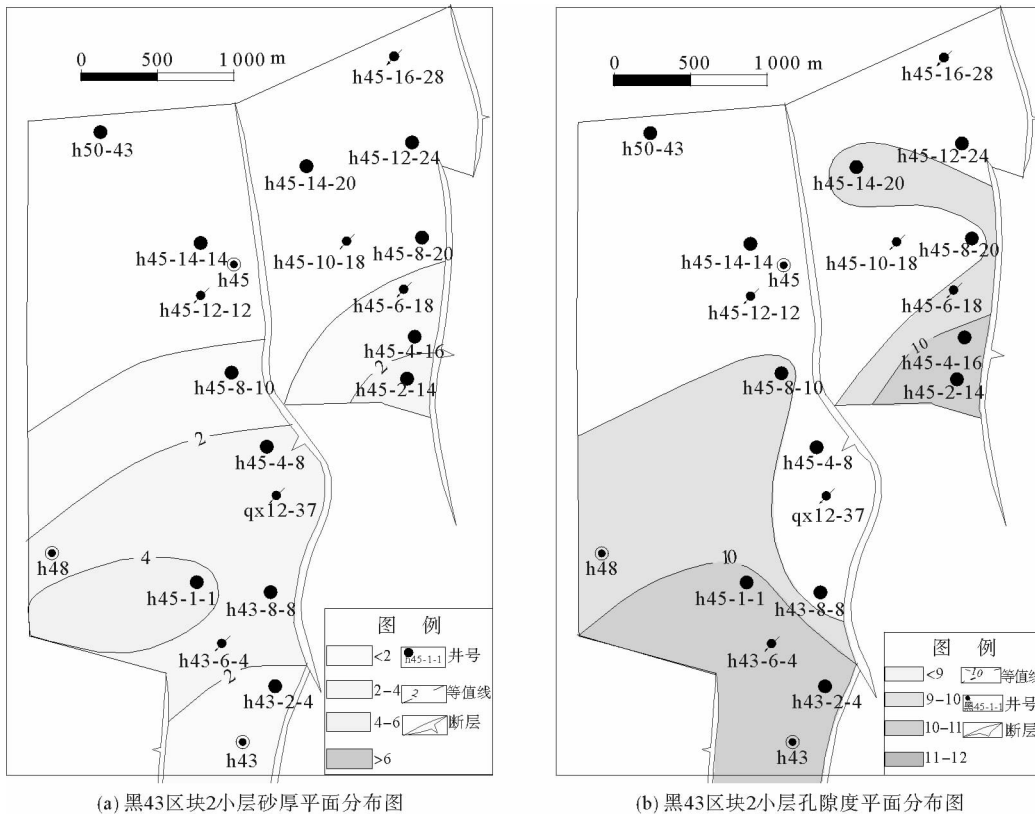


图 3 黑 43 区块 I 砂组 2 小层砂体厚度和孔隙度对比分布图

Fig. 3 Sand body thickness and porosity distribution of 2 small layer, I sand group, Hei-43 Block

黑 45-10-10 井第一层监测的人工裂缝方向为北东东向,主缝(深灰色)NE71.9°,有一条显著的支缝,为 NEE 向。高度不平稳,东翼前缘略有下伏(图 4)。两翼裂缝长度不对称,东翼进水裂缝长度 88.3 m,西翼偏长(95.7 m),近井裂隙不发育,为 NEE 向,倾角为 0°,裂缝面倾向直立,实际进水裂缝尺度是监测尺度的 2/3。

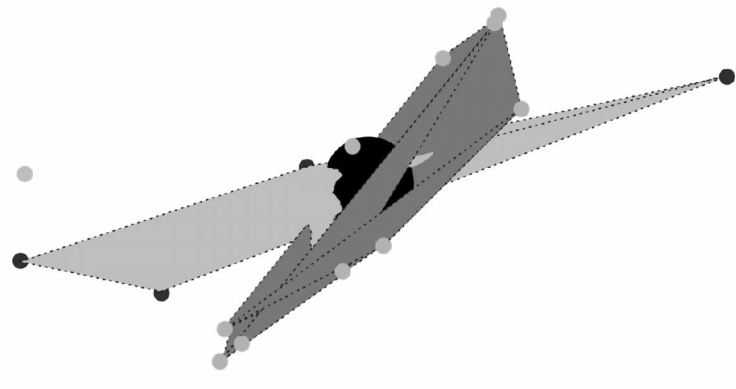


图 4 黑 45-10-10 井人工裂缝立体俯视图

Fig. 4 The three-dimensional vertical view of artificial fractures, well H 45-10-10

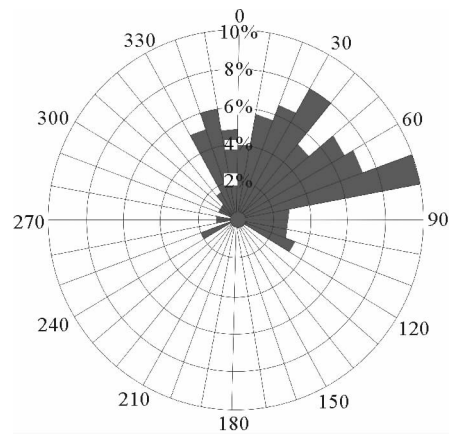


图 5 黑 45-10-10 井裂缝玫瑰图

Fig. 5 Rose diagram of fractures, well H 45-10-10

通过人工压裂过程中产生的裂缝监测报告来看,这与现代构造应力场和出露地层的研究结果一致。黑

43 区块的裂缝优势方位基本上是北偏东 71.9° (图 5)。裂缝的存在是低孔低渗类储层得以有效开发的有利条件, 搞清裂缝发育的方向和裂缝形成及演化规律, 可以正确指导非常规复杂储层的评价。黑 43 区块低渗透砂岩储层裂缝以高角度构造裂缝为主, 裂缝的发育受岩性、岩层厚度、沉积微相、构造和应力等因素控制。

2.4 低幅度构造对储层物性的影响

黑 43 区块位于大情字井油田向斜轴部, 中央断裂带的南端, 为一 SWW 倾向正断层控制的低幅度背斜构造。断层较为发育, 走向多为 NNW 向的小断层, 延伸长度为 0.5~3.5 km。与断层相匹配的低幅度背斜构造是油气聚集成藏的前提^[11]。油藏油层性质主要为油水同层, 油水重力分异差, 无统一油水界面, 油水关系复杂, 油藏范围和油水分布受储层砂体类型、分布及岩性、物性变化的控制(图 6)。从图 6 中可以看出, 砂体展布纵向上从下到上逐渐萎缩, 其中以 12 小层砂体分布面积最大。青一段各小层砂体平面展布由南向北, 自西而东呈减薄趋势。

黑 43 区块是受反向断层控制的中央断裂带油藏, 断层在区块非岩性油藏的形成过程中起关键性的控制作用, 主要表现在两个方面:

1) 断层活动形成裂缝, 有利于次生孔隙的形成, 提高了储层孔隙度和渗透率。通过实测物性数据可以看出, 一般靠近断层的储层物性较好, 以距离较近的 h45-8-16 井和 h45-14-20 井为例, 两井位于断层同一盘, 在青一段 7 小层均沉积了河口沙坝砂体, 其中 h45-8-16 井紧靠断层, 孔隙度 14.35%, 渗透率 $2.44 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 而 h45-14-20 井远离断层, 孔隙度 9.50%, 渗透率仅 $0.51 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2) 断裂破坏盖层的连续性, 使得油气得以穿过盖层而进入浅部地层, 成为沟通油源与聚集区的桥梁。与砂岩储集层的疏导性能相比, 断裂是油气运移的快速通道。黑 43 区块的油层主要为低孔低渗型储层, 储层的疏导作用是非常微弱的, 而且砂体连通性差, 非渗透层含量高, 需要断层作为油气大规模运移的垂向通道。黑 43 区块所处的中央断裂带内部含油性相对较差, 青山口组青一段砂岩以水层为主, 中央断裂带通过影响大情字井向斜两侧的构造形变, 控制了油气藏的平面分布特征。

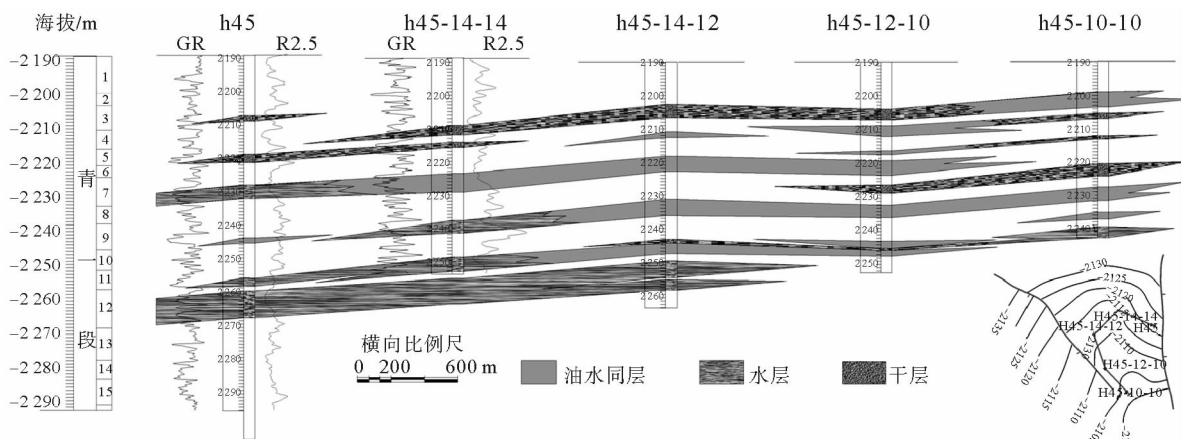


图 6 大情字井油田黑 43 区块低幅度构造-岩性油藏剖面图

Fig. 6 Reservoir section of low amplitude structures- lithologic reservoir, Hei-43 Block, Daqingzijing Oilfield

3 储层性质对单井产能的影响

黑 43 区块单井产能主要受物性特征、沉积微相和裂缝发育等影响。通过对收集到的试油资料进行挑选分析, 沉积微相和物性特征是产能的控制因素^[12](表 2)。

通过对比区块内各沉积微相砂体的储层物性综合指数与日产量的关系, 河口沙坝日产油较高, 前缘沙坝次之, 前缘沙席产能较低。黑 43 区块青山口组储集层的岩性主要有粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂

表 2 黑 43 区块单井产能影响因素对比表

Tab. 2 Controlling factors comparison of single well productivity, H 43 Block

井号	层位	砂组	小层	日产油 /t	油层厚度 /m	岩性	试油结果	沉积相	孔隙度 /%	渗透率 /(10 ⁻³ μm ²)	综合物性 指数
h43	qn1	I	1	1.2	2.0	粉砂岩	油水层	前缘沙坝	10.22	1.89	1.01
h45-1-1	qn1	III	12	2.7	1.8	粉砂岩	水层	河口沙坝	13.17	1.76	2.74
h45-6-16	qn1	IV	13	0.3	1.0	粉砂岩	油水层	前缘沙席	6.22	1.21	0.93
h45-10-18	qn1	II	7	3.2	1.2	细砂岩	油层	河口沙坝	11.39	0.84	3.68
h45-10-20	qn1	III	11	3.0	1.3	粉砂岩	油水层	河口沙坝	11.25	0.93	3.48
h45-12-12	qn1	III	9	3.6	1.7	粉砂岩	油水层	前缘沙坝	10.88	0.60	4.25
h45-12-22	qn1	II	7	3.9	1.0	细砂岩	油层	前缘沙席	9.67	0.40	4.91
h45-12-24	qn1	II	7	2.8	1.1	细砂岩	油层	河口沙坝	10.73	0.76	3.76
h45-14-12	qn1	III	11	3.3	1.8	粉砂岩	油水层	河口沙坝	10.85	0.65	4.08
h45-26-22	qn1	IV	13	0.9	3.4	粉砂岩	油水层	前缘沙席	7.15	0.76	0.86
h45	qn1	I	1	4.8	0.8	粉砂岩	油水层	前缘沙坝	18.03	1.34	5.16

岩等,以泥质粉砂岩和粉砂岩为主,通过分析岩性录井图和综合录井图,粉砂岩中的含油级别较高,一般为油浸级别,含油饱满。

试油资料的分析中,引入综合物性指数($\sqrt{K/\phi}$),通过对比孔隙度、渗透率、综合物性指数与日产油量的相关关系可知:综合物性指数与日产量呈良好的正相关关系,且相关系数较其他两种大,因此,可运用综合物性指数这一综合性参数来反映物性特征对产能的影响^[13](图 7~9)。

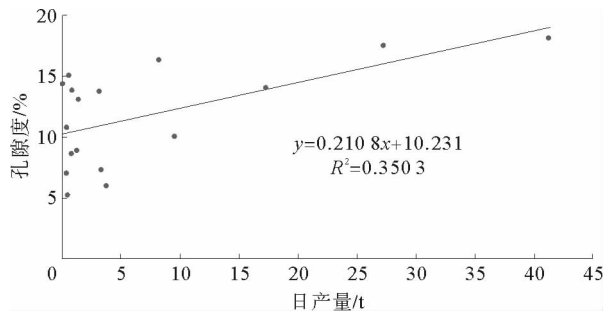


图 7 黑 43 井区孔隙度与日产量关系图

Fig. 7 The relationship between porosity and daily production of Hei-43 Block

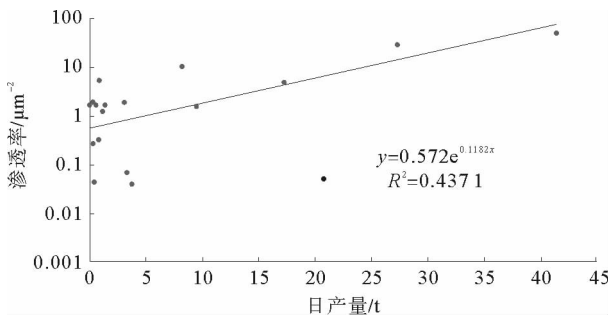


图 8 黑 43 井区渗透率与日产量关系图

Fig. 8 The relationship between permeability and daily production of Hei-43 Block

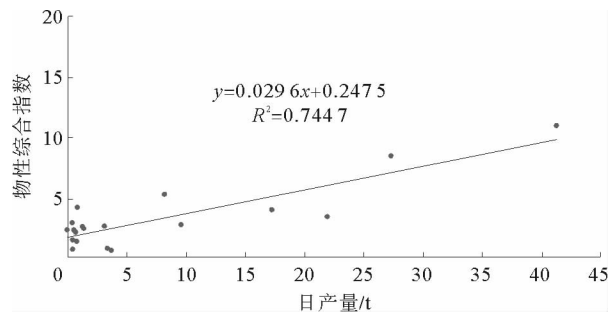


图 9 黑 43 区块物性综合指数与日产量关系图

Fig. 9 The relationship between daily production and comprehensive index of Hei-43 Block

4 结论

1)黑 43 区块的储层控制因素主要包括沉积微相、砂体分布、裂缝发育和低幅度向斜构造。在近物缘方向,储层主要受构造控制发育构造油气藏;而在远物缘方向,储层受岩性控制,主要发育岩性油气藏;在向斜的轴部储层受构造、岩性的双重控制,主要发育构造-岩性油气藏,即复合油气藏。

2)黑 43 区块单井产能主要受物性特征、沉积微相以及裂缝等方面影响。沉积微相和物性特征是产能的控制因素,综合性指数与日产油呈良好的正相关关系,河口沙坝日产油较高,而前缘沙席产能较低。裂缝的发育有效改善了储集物性,单井产能总体较高。

参考文献:

- [1]关德师,李建忠. 松辽盆地南部岩性油藏成藏要素及勘探方向[J]. 石油学报,2003,24(3):24-27.
Guan Deshi, Li Jianzhong. Factors for controlling lithologic oil pool formation and exploration prospects in southern Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(3): 24-27.
- [2]刘宝柱,魏志平,唐振兴. 大情字井地区低孔、低渗型岩性油藏成因探讨[J]. 特种油气藏,2004,11(1):24-27.
Liu Baozhu, Wei Zhiping, Tang Zhenxing. Genesis study of low porosity, low permeability, lithologic reservoirs in Daqingzi area[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2004, 11(1): 24-27.
- [3]魏兆胜,宋新民,唐振兴,等. 大情字井地区上白垩统青山口组沉积相与岩性油藏[J]. 石油勘探与开发,2007,34(1):28-33.
Wei Zhaosheng, Song Xinmin, Tang Zhenxing, et al. Sedimentary facies and lithologic oil pools of the Upper Cretaceous Qingshankou Formation in Daqingzijing area[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 28-33.
- [4]张金亮,谢俊. 石油开发地质学[M]. 北京:石油工业出版社,2011:184-202.
- [5]赵澄林,朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京:石油工业出版社,2001:264-268.
- [6]张金亮,谢俊. 储层沉积相[M]. 北京:石油工业出版社,2008:130-168.
- [7]王安辉,赵全军. 大情字井油田 157 区块青三段储层孔隙特征研究[J]. 石油天然气学报:江汉石油学院学报,2011,33(7):37-41.
Wang Anhui, Zhao Quanjun. E₃ reservoir porosity characteristics of well-block Qian 157 in Daqingzijing Oilfield[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(7): 37-41.
- [8]张大伟,陈发景,程刚. 松辽盆地大情字井地区高台子油层储集层孔隙结构的微观特征[J]. 石油与天然气地质,2006,27(5):668-674.
Zhang Dawei, Chen Fajing, Cheng Gang. The microscopic features of pore structure in Gaotaizi oil layer of Daqingzijing area [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(5): 668-674.
- [9]李建忠,杨涛,王立武,等. 松辽南部大情字井地区断裂构造特征及其控油作用[J]. 石油勘探与开发,2004,31(1):18-20.
Li Jianzhong, Yang Tao, Wang Liwu, et al. The fault structure and its controlling role to hydrocarbon accumulation in Daqingzijing area, southern Songliao Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(1): 18-20.
- [10]杨明达,杨铭辉,周健,等. 松辽盆地南部大情字井地区油气分布控制因素分析[J]. 石油实验地质,2003,25(3):252-256.
Yang Mingda, Yang Minghui, Zhou Jian, et al. Analysis of hydrocarbon distribution in Daqingzijing area of the southern Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(3): 252-256.
- [11]杨玉峰. 松辽盆地岩性油藏形成条件与分布规律[J]. 石油与天然气地质,2004,25(4):393-399.
Yang Yufeng. Formation conditions and distribution of lithologic pools in Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(4): 393-399.
- [12]黄力,何顺利,张小霞,等. 超低渗透储层产能主要影响因素确定方法研究[J]. 科学技术与工程,2010,30(10):7408-7413.
Huang Li, He Shunli, Zhang Xiaoxia, et al. Research on determination of the main factors influencing the oil well productivity of ultra low permeability reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 30(10): 7408-7413.
- [13]王智,许江文,谷斌. 基于测井资料的低孔低渗储层产能预测研究[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2009,31(6):51-55.
Wang Zhi, Xu Jiangwen, Gu Bin. Low porosity and low permeability reservoir deliverability based on well logging data[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2009, 31(6): 51-55.

(责任编辑:高丽华)